LE SOLEIL

PARIS. — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS,
Quai des Augustins, 55.

LE
SOLEIL

PAR

LE P. A. SECCHI S. J.

Directeur de l'Observatoire du Collége Romain,
Correspondant de l'Institut de France.

DEUXIÈME ÉDITION, REVUE ET AUGMENTÉE.

PREMIÈRE PARTIE.

TEXTE.



PARIS,

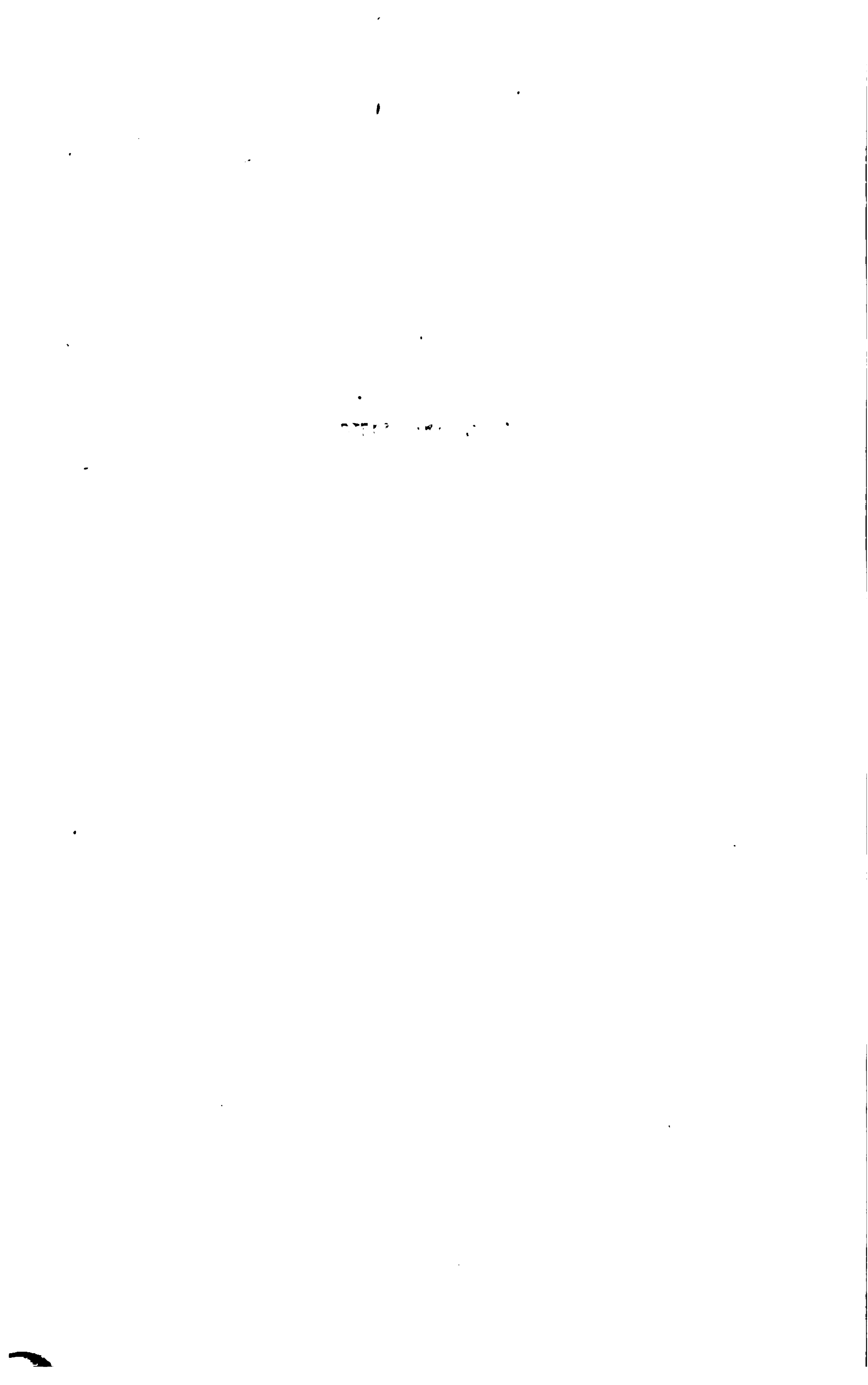
GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,

Quai des Augustins, 55.

1875



INTRODUCTION A LA PRÉSENTE ÉDITION.

L'accueil favorable que cet Ouvrage a reçu des savants m'a encouragé à le perfectionner en lui donnant de nouveaux développements; ce n'est donc pas simplement une seconde édition que nous offrons au public, c'est un ouvrage complétement refondu et presque entièrement nouveau.

Au moment où parut la première édition, la Science, récemment enrichie d'une découverte féconde, mettait à profit ses nouvelles ressources pour faire des progrès rapides et nombreux : aussi notre Ouvrage se trouva-t-il bientôt en arrière. Dans l'édition allemande faite par M. Schellen, j'ai cherché à combler un grand nombre de lacunes ; mais les découvertes se succédaient si rapidement, qu'il fallut reléguer dans un Appendice celles qui s'étaient faites pendant l'impression de l'Ouvrage. A cette époque, un grand nombre de faits intéressants demeuraient encore isolés les uns des autres, sans lien commun qui servît à les réunir en corps de doctrine. Les années qui viennent de s'écouler ont comblé plusieurs de ces lacunes : par exemple, la théorie des éruptions

solaires était à peine ébauchée; nous ne prétendons pas qu'elle soit complète aujourd'hui, mais elle a certainement fait de grands progrès, et nous commençons à voir les relations qui existent entre les mouvements éruptifs et les autres phénomènes de la Physique solaire. Ces questions étaient à peine indiquées dans la première édition; nous les avons traitées dans celle-ci avec tous les développements qu'elles comportent.

Nous avons aussi donné une plus grande étendue à l'historique de plusieurs découvertes, et nous pensons avoir ainsi satisfait aux plaintes de certains savants qui nous reprochaient de n'avoir pas apprécié leurs travaux comme ils méritaient de l'être. Dans un ouvrage de longue haleine, il est bien difficile de rendre justice à tout le monde; s'il nous est arrivé d'attacher moins d'importance qu'il ne faudrait à certains travaux, nous espérons qu'au lieu de nous supposer quelque mauvaise intention on voudra bien attribuer ce malheur à la difficulté du travail. Du reste, quoique le commerce littéraire soit actuellement très-actif, nous n'hésitons pas à affirmer que les Italiens pourraient adresser aux savants étrangers bien des réclamations de ce genre. Cela tient à deux causes : la première est le nombre toujours croissant de ceux qui se livrent à ces recherches; il devient ainsi bien difficile de se tenir au courant de ces observations si multipliées; — la seconde est la multitude de langues dans lesquelles sont publiés les travaux modernes, ce qui augmente singulièrement la difficulté que présente leur étude.

L'Angleterre est représentée par un groupe exceptionnelle-

ment nombreux de savants qui étudient avec soin la Physique solaire; leur langue étant très-répandue, il est plus facile de se tenir au courant des résultats auxquels ils parviennent: aussi avons-nous largement puisé dans leurs publications, afin de rendre justice à chacun d'eux. Notre intention n'a cependant pas été de faire une simple compilation analogue à quelques ouvrages anglais. Il y a dans la Science deux branches essentielles et vitales : l'étude des faits et la recherche des liens qui les unissent. Les faits doivent être coordonnés de manière à éviter les redites, les anachronismes et cette multitude de détails qui sont importants dans un Mémoire original, mais qui, dans un Ouvrage d'ensemble, ne peuvent que produire la confusion dans l'esprit du lecteur, par la répétition d'une foule de circonstances particulières qui se retrouvent à peu près les mêmes dans toutes les observations. En faisant une compilation et pour ainsi dire un recueil de Mémoires, il est facile d'offrir au public de gros et beaux volumes; mais on n'y retrouve point d'unité scientifique, et le développement des idées y est à chaque instant interrompu. Ces publications ont rendu de grands services; mais notre travail n'est pas devenu pour cela inutile, car nous nous proposions un but différent, celui de coordonner d'une manière logique l'immense multitude de faits recueillis dans ces dernières années.

Nous ne nous sommes pas contenté de réunir ces faits et de les coordonner, nous avons aussi voulu les vérifier et en acquérir une connaissance directe et approfondie en les étudiant avec soin. Nous avons donc cherché à rendre justice aux sa-

vants en conservant à chacun ses droits de propriété; mais, en même temps, nous avons tenu à exposer les faits tels qu'ils se présentent à notre expérience personnelle; c'est ainsi que notre Ouvrage a pris un cachet particulier et original. On nous a accusé à ce propos d'avoir voulu persuader à nos lecteurs que nous avons porté seul *tout le poids de la chaleur et du jour!* Nous n'avons jamais eu cette prétention, nos lecteurs le savent bien; nous avons seulement voulu, tout en citant les découvertes des autres, décrire les phénomènes avec cette sûreté et cette précision que l'observation personnelle peut seule donner à un écrivain. L'expérience nous a trop bien appris qu'un grand nombre de discussions naissent et se compliquent outre mesure, parce qu'on n'observe pas assez les faits qui servent de fondement aux théories.

Du reste, après avoir rendu à chacun ce qui lui appartient, nous ne devons pas nous oublier nous-même; on ne sera pas surpris, par exemple, si nous nous attribuons l'honneur d'avoir complété, avec des soins si assidus, certaines recherches à peine indiquées par leurs auteurs, qui s'en étaient détournés pour se livrer à d'autres travaux, plus brillants peut-être, mais non plus fertiles. D'ailleurs il y a tant de savants à notre époque, presque tous armés de puissants instruments, que plusieurs d'entre eux peuvent bien se rencontrer poursuivant les mêmes idées et découvrant les mêmes faits. L'étude de la Physique solaire a donné, il y a deux siècles et demi, un exemple frappant de ces coïncidences, exemple qui peut bien se renouveler de nos jours.

Avant de terminer cette Introduction, il me reste à rendre

hommage au traducteur et à l'éditeur qui ont concouru à notre œuvre. Le R. P. Larcher a bien voulu me venir en aide, cette fois encore, pour rendre mes idées avec cette précision et cette élégance qui caractérisent la langue française : je le prie d'accepter ici tous mes remercîments.

L'éditeur, M. Gauthier-Villars, a voulu faire un Ouvrage de premier ordre au point de vue typographique. Aux difficultés inhérentes à ce genre de travail s'ajoutait encore la nécessité de consulter souvent l'auteur, tant pour le texte que pour les figures, malgré la distance qui sépare Rome de Paris. Pour mener à bon terme une pareille entreprise, il fallait un dévouement peu commun, et le lecteur reconnaîtra qu'on n'a rien négligé pour réunir la précision et la clarté du langage, la beauté et l'élégance de l'exécution typographique, malgré les difficultés que présentaient le sujet et les circonstances. Je serai heureux si j'ai pu répondre au dévouement et à l'habileté de mes deux amis.

A. Secchi.



INTRODUCTION DE LA PREMIÈRE ÉDITION.

Qu'est-ce que le Soleil? Quel est cet astre radieux et puissant qui dissipe les ténèbres de la nuit, apporte sur la Terre la lumière du jour, qui nous inonde de chaleur, de lumière et de vie, en même temps que par son attraction mystérieuse il retient autour de lui le système des planètes, contribuant ainsi d'une manière active à maintenir l'ordre dans la création? Telle est la question que se pose tout homme qui aime à réfléchir sur les grands phénomènes de la nature, au lieu d'imiter les êtres sans raison qui se nourrissent des fruits qu'ils rencontrent sur le sol sans jamais élever leurs regards vers l'arbre qui les produit.

Plusieurs peuples de l'antiquité adoraient le Soleil, erreur moins humiliante peut-être que beaucoup d'autres, car cet astre est l'image la plus parfaite de la Divinité, l'instrument dont se sert le Créateur pour nous communiquer presque tous ses bienfaits dans l'ordre physique. Bien qu'à nos yeux il ne soit plus qu'une simple créature, son étude est cependant l'une des plus relevées auxquelles puisse se livrer un savant, et l'histoire des conquêtes faites dans ce champ inépuisable sera toujours un des objets les plus dignes de notre attention et les plus capables de nous édifier.

Malheureusement la science est loin d'être à la hauteur de

son sujet. Ce ne sont ni les recherches, ni les spéculations qui font défaut; les difficultés inhérentes à la nature même de cette étude paralysent nos efforts, et, malgré l'activité que nous déployons, *vincit natura latendi :* la nature veut encore rester cachée. Mais notre génération, qui a démenti ces paroles en découvrant les sources du Nil, réussira peut-être un jour à dérober au Soleil ces secrets qu'il cache si habilement, non en les enveloppant de ténèbres, mais en les éclairant d'une lumière éblouissante.

L'histoire nous apprend que toutes les découvertes de la science, tous les perfectionnements apportés aux méthodes d'observation ont été immédiatement appliqués à l'étude du Soleil; la Physique solaire a fait un pas en avant toutes les fois que la Physique générale a fait une conquête. La découverte des lunettes fit d'abord connaître son mouvement de rotation, l'existence, la structure, les variations de ses taches et la manière dont la lumière est distribuée à sa surface. Ne manquons pas de signaler l'emploi des verres colorés qui suivit de près la découverte du télescope; c'est grâce à eux que le P. Scheiner put se livrer avec tant de fruit à une étude qui priva de la vue l'infortuné Galilée.

Ces premiers moyens d'observation eurent bientôt produit tout ce qu'on pouvait en attendre. Il en résulta un temps d'arrêt dans les progrès de nos connaissances et une indifférence profonde pour ce genre de recherches. On désespérait même de cette branche de l'Astronomie lorsque W. Herschel se mit à l'œuvre avec les instruments qu'il avait construits de ses propres mains. L'étude du Soleil fit avec lui de grands progrès, mais ses découvertes et ses méthodes lui restèrent personnelles comme ses instruments; il n'eut pas d'imitateurs, et après lui commença un second temps d'arrêt.

Cependant l'Optique faisait des progrès; les grands instru-

ments devenaient plus nombreux et préparaient de nouvelles découvertes; mais ils ne faisaient que les préparer, car ces instruments si perfectionnés restèrent assez longtemps inutiles; c'est seulement de nos jours qu'on a trouvé des méthodes permettant d'employer à l'étude du Soleil les grossissements énormes auxquels se prêtent les plus grandes lunettes.

Mais ce qui a fait surtout avancer la Physique solaire, c'est le perfectionnement de la théorie mathématique des mouvements célestes. Lorsque, dans le calcul d'une éclipse, on fut parvenu à déterminer d'une manière précise les lieux où devait passer la ligne centrale de la totalité, alors seulement les astronomes purent se réunir en grand nombre dans ces lieux privilégiés, apportant avec eux des instruments de toute grandeur et de toute nature, ce qui leur a permis de faire les découvertes les plus inattendues.

La Photographie ne pouvait manquer de venir en aide à l'étude du Soleil : elle nous a fourni des dessins représentant avec la précision la plus absolue les taches avec tous leurs détails, et les différentes phases des éclipses; elle nous a rendu d'immenses services dans ces courts instants des éclipses totales où l'œil se trouve surpris et reste incertain; c'est elle qui nous a donné le moyen de résoudre en quelques instants des questions agitées depuis bien des années.

La persévérance avec laquelle on a observé les taches a permis de constater la périodicité de ce phénomène, et dans cette étude on a tiré un grand parti d'ouvrages autrefois décriés et tournés en ridicule, mais qui contenaient malgré cela des documents précieux. En comparant ces périodes des vicissitudes solaires avec d'autres phénomènes qui n'ont avec elles aucune relation apparente, on a pu établir que le Soleil n'agit pas seulement comme centre d'attraction et comme

foyer de lumière, mais qu'il exerce une action incontestable sur les phénomènes magnétiques.

Enfin l'analyse spectrale a ouvert une immense carrière que nous aurions dû croire fermée pour toujours : elle nous a fait connaître la nature chimique des substances qui composent l'atmosphère solaire, et même d'une manière approchée la température de cette atmosphère. On a pu ainsi faire l'analyse qualitative de l'astre du jour, et l'on a même appris tout récemment à étudier en tout temps certains phénomènes que nous ne pouvions autrefois observer pendant les éclipses totales. C'est ainsi que la Chimie, à son tour, est venue en aide à l'Astronomie. La belle découverte de la dissociation et la Théorie mécanique de la chaleur nous ont enfin montré en quoi consiste la puissance calorifique du Soleil, et nous ont expliqué comment cette puissance peut rester la même pendant tant de siècles, malgré le rayonnement continuel qui semble devoir l'appauvrir en peu de temps.

Dans l'état où se trouve actuellement la science, j'ai cru qu'il était temps de réunir en quelques pages l'ensemble de ces merveilleuses découvertes qui font tant d'honneur aux savants de notre époque, et qui ont l'avantage de joindre l'agréable à l'utile.

Afin de suivre l'ordre des idées, j'exposerai d'abord les travaux des anciens, mais brièvement, sans m'occuper de questions inutiles, ni de résultats hypothétiques. De plus, afin de rendre cet Ouvrage accessible à un plus grand nombre de personnes, j'entrerai quelquefois dans des détails qui ne seraient pas nécessaires pour des savants, mais qu'on me pardonnera en considération du but que je me suis proposé.

La contemplation des œuvres de Dieu est une des plus nobles occupations de l'esprit, c'est le but principal de l'étude de la nature; mais cette étude nous conduit souvent à des

résultats utiles que nous ne saurions dédaigner. L'étude du Soleil ne paraît pas, pour le moment du moins, nous présenter cet avantage. Quelles que soient nos recherches et les connaissances que nous pourrons acquérir, il ne sera jamais en notre pouvoir de régler l'influence du Soleil. Cependant l'action de cet astre est trop intimement liée avec les phénomènes de la vie, de la chaleur et de la lumière, pour qu'il soit inutile de chercher à connaître sa nature. Et d'ailleurs, qui sait s'il n'y a pas une relation intime entre certains phénomènes solaires et quelques phénomènes terrestres qu'il serait si important pour nous de prévoir avec quelque certitude!

Mais ce serait sortir de notre sujet que de l'envisager ainsi; les merveilles de la création ne doivent pas être exclusivement étudiées au misérable point de vue de l'utilité du moment. Nous savons par expérience que ce qui paraît n'être aujourd'hui qu'une spéculation oiseuse peut devenir demain une source de richesse; après tout, l'homme ne vit pas seulement de pain, il doit encore, pour entretenir la vie de son âme, s'assimiler les vérités abstraites ou sensibles dont l'ensemble constitue pour notre intelligence la parole du Créateur.

Nous allons donc aborder cet important sujet auquel nous avons, pendant plusieurs années, consacré tous nos soins et toutes nos recherches. Nous ne nous bornerons pas à exposer nos propres travaux; nous prendrons le vrai et le beau partout où nous le trouverons. Mais nous n'énoncerons aucune opinion sans avoir vérifié par nous-même les faits sur lesquels elle repose; nous n'exposerons aucune théorie sans l'avoir constatée autant que le comporte la nature même du sujet.

Cet Ouvrage, que nous publions aujourd'hui pour la première fois, était composé en italien depuis plusieurs années; nous en avons donné un spécimen dans une conférence faite

en 1867 aux élèves de l'École Sainte-Geneviève et reproduite par les *Études religieuses*. A la sollicitation de plusieurs de nos amis, nous l'avons écrit en français, en l'abrégeant un peu. Le R. P. Larcher, professeur de Physique à l'École Sainte-Geneviève, a bien voulu retoucher notre manuscrit, afin que le style ne laissât rien à désirer sous le rapport de la correction et de l'élégance; il a traduit notre pensée avec la plus grande exactitude, en conservant presque toujours les expressions que nous avions nous-même employées; nous ne saurions trop le remercier de la patience et du dévouement dont il a fait preuve dans ce long et pénible travail. Quoique cette précaution ne fût pas nécessaire, nous avons revu toutes les épreuves, afin d'éviter les erreurs qui se glissent si facilement dans les Ouvrages ainsi composés. L'éditeur et le graveur n'ont rien négligé pour assurer la perfection typographique et artistique : aussi avons-nous lieu d'espérer que les lecteurs seront satisfaits. En publiant cet Ouvrage en français, l'auteur est heureux de pouvoir payer à la France une faible partie du tribut de reconnaissance qu'il lui doit pour l'accueil plein de sympathie qu'il a reçu pendant l'Exposition universelle.

Puisse ce travail être utile au lecteur, en l'instruisant et en l'invitant à rendre hommage à Celui qui a placé sa tente dans le Soleil : *in Sole posuit tabernaculum suum Altissimus.*

TABLE DES MATIÈRES.

LIVRE II.

EXAMEN DE LA SURFACE DU SOLEIL.

LIVRE III.

DE L'ATMOSPHÈRE SOLAIRE.

LIVRE IV.

LES ÉCLIPSES.

CHAPITRE PREMIER. — PHÉNOMÈNES OBSERVÉS PENDANT LES ÉCLIPSES.

CHAPITRE II. — DE LA COURONNE.

CHAPITRE III. — DES PROTUBÉRANCES OU PROÉMINENCES ROSES QU'ON OBSERVE PENDANT LES ÉCLIPSES TOTALES DU SOLEIL.

CHAPITRE IV. — OBSERVATIONS SPECTRALES FAITES PENDANT LES ÉCLIPSES.

NOTE.



LE SOLEIL.

PREMIÈRE PARTIE.

STRUCTURE DU SOLEIL.

LIVRE PREMIER.

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES PHÉNOMÈNES SOLAIRES.

CHAPITRE PREMIER.

ASPECT GÉNÉRAL DU SOLEIL.

§ I. — *Dimensions du Soleil.*

Le Soleil se présente à nos yeux comme un disque rond sous-tendant un angle d'environ 32 minutes et 3 secondes, c'est-à-dire un peu plus d'un demi-degré ([1]). Si nous tenons compte de la distance, ce diamètre apparent suppose des dimensions énormes, dont il est difficile de nous faire une idée exacte. La distance moyenne qui sépare le Soleil de la Terre est égale à 23150 rayons terrestres, c'est-à-dire 148 millions de kilomètres. Le diamètre réel du Soleil est 108 fois le diamètre de notre planète, soit 1 377 452 kilo-

([1]) Nous reviendrons plus tard sur la valeur et l'exactitude de ces chiffres; nous ne les citons en ce moment que pour donner une première idée des dimensions apparentes du Soleil.

mètres; son rayon est presque le double de la distance de la Lune à la Terre, et, par conséquent, son volume est à peine inférieur à celui de huit sphères ayant un rayon égal à la distance qui nous sépare de la Lune. Il est 1 259 712 fois plus gros que la Terre; un arc d'une seconde, vu de la Terre au centre du disque solaire, est équivalent à 715 kilomètres, ce qui fait 42900 kilomètres pour un arc d'une minute; et cependant nous verrons qu'on observe fréquemment des taches dont le diamètre est d'une minute, et même des flammes ayant une hauteur de trois minutes, c'est-à-dire 128 700 kilomètres. Les fils d'araignée qu'on emploie pour les micromètres sous-tendent un angle d'un tiers de seconde dans une lunette de $4^{m},30$: ils couvrent donc une largeur de 238 kilomètres. Ces exemples suffisent pour faire comprendre que des objets que nous pouvons à peine distinguer ont en réalité des dimensions énormes. La Terre entière, vue à la distance qui nous sépare du Soleil, aurait pour diamètre apparent $17'',82$; son rayon, qui est de 6377 kilomètres à l'équateur, sous-tendrait donc un angle de $8'',91$: c'est la valeur de la parallaxe équatoriale du Soleil actuellement adoptée, et sur laquelle reposent tous nos calculs. Ces nombres nous serviront bientôt pour apprécier les dimensions des objets que nous voyons sur le disque solaire et pour en évaluer les mouvements.

§ II. — *Taches solaires.*

Les anciens ne connaissaient aucune des particularités relatives à la constitution physique du Soleil. On avait bien signalé de temps en temps quelques taches noires que l'on pouvait distinguer à l'œil nu lorsqu'il était près de l'horizon; mais on les prenait pour des planètes en conjonction ou pour

des phénomènes dont la cause était inconnue. Telles sont les taches qui furent observées en 807, 840, 1096, 1588. Kepler lui-même crut observer le passage de Mercure sur le Soleil; c'était une tache qu'il avait sous les yeux.

Les Chinois nous ont de beaucoup devancés dans cette découverte. L'Ouvrage encyclopédique de Ma-Twan-Lin contient un tableau remarquable de 45 observations faites entre les années 301 et 1205 de l'ère vulgaire, c'est-à-dire dans un intervalle de 904 ans. Pour donner une idée de la grandeur relative des taches, les observateurs les comparent à un œuf, à une datte, à une prune, etc. Les observations se prolongent souvent pendant plusieurs jours; quelques-unes ont même été faites pendant dix jours consécutifs. On ne peut douter de la réalité et de l'exactitude de ces observations, et cependant elles ont été inutiles aux Européens, car elles n'ont été publiées que dans ces derniers temps (1).

Les astronomes chinois ne nous ont point fait connaître la méthode qu'ils employaient pour ces observations; mais on sait qu'avec un simple verre recouvert de noir de fumée on peut voir à l'œil nu les taches les plus considérables. Avant que les lunettes fussent connues, on recevait les rayons solaires dans la chambre obscure par un petit trou circulaire pratiqué dans le volet. C'est ainsi que Jean Fabricius réussit, en décembre 1610, à voir une tache considérable et à étudier son mouvement d'une manière assez précise pour pouvoir en conclure le mouvement de rotation du Soleil. Mais cette observation ne fut publiée que plus tard, alors que d'autres observateurs, armés de lunette, avaient obtenu de meilleurs résultats.

---

(1) V. Williams, *Month. not. Astr. soc.*, vol. XXXIII, p. 370; april.

On peut facilement observer les taches du Soleil, même avec des lunettes d'assez petites dimensions, en ayant soin de placer en avant de l'oculaire un verre fortement coloré. Elles se présentent ordinairement comme des points noirs de forme ronde; bien souvent, cependant, elles sont groupées de manière à former par leur ensemble des figures très-irrégulières.

Fig. 1.



La partie centrale est noire; on l'appelle le *noyau* ou l'*ombre :* le contour est formé par une demi-teinte qu'on appelle la *pénombre*. Les contours de l'ombre et ceux de la pénombre sont nettement tranchés, au moins dans la plupart des cas.

Les dimensions des taches sont extrêmement variables. Quelques-unes se présentent comme de simples points noirs,

qu'on appelle des *pores;* on en voit fréquemment qui sous-tendent des angles de 30 à 40 secondes. Les grandes taches sont rares, et résultent ordinairement de plusieurs taches juxtaposées. On a vu des groupes semblables atteignant plusieurs minutes de diamètre; leur surface était donc plus grande que celle de la Terre, plus grande même que celle de la planète Jupiter. Pour donner au lecteur une idée de la structure et de la grandeur relative des taches, nous reproduisons ici (*fig.* 1) une photographie du Soleil obtenue par M. Rutherfurd, le 22 septembre 1870, à $9^h 26^m 10^s$, temps sidéral de New-York.

Sur les bords du disque, on voit de petites taches blanches que les astronomes appellent *facules;* nous les étudierons bientôt. Toutes ces taches changent de place et de forme, d'après des lois que nous apprendrons à connaître. Enfin les bords de l'image sont toujours beaucoup moins lumineux que le centre; on le reconnaît facilement en employant un fort grossissement, et en passant rapidement du bord au centre du disque solaire. Cette expérience réussit très-bien par la méthode des projections, que nous expliquerons bientôt.

§ III. — *Découverte des taches solaires.*

La découverte des taches est une de celles dont on peut dire qu'elles sont faites par une époque et non par un homme. Plusieurs savants ayant à leur disposition des lunettes, ils devaient tôt ou tard les diriger vers le Soleil. La seule difficulté consistait à protéger les yeux de l'observateur. Ainsi Galilée montrait les taches aux littérateurs de Rome, dans le jardin Bandini, mais seulement lorsque le Soleil était auprès de l'horizon; à la même époque (mars 1611), Scheiner les observait à Ingolstadt, à l'aide d'un verre bleu placé en avant

de l'oculaire ([1]). Pendant ce temps, Fabricius préparait en secret l'édition de son célèbre Mémoire : il a donc devancé tous ses contemporains, mais ses découvertes ne furent connues que plus tard. Si Galilée a précédé Scheiner dans l'observation des taches, il ne les étudia pas d'une manière suivie, et il n'en comprit l'importance qu'après la publication des trois lettres pseudonymes adressées par le jésuite allemand à Marc Velser, bourgmestre d'Augsbourg, sous la date du 12 décembre 1611. Scheiner parlait dans ces lettres du nombre des taches, de la variation de leurs formes, et de leur mouvement apparent sur le disque solaire; il parle également des pénombres, des facules et des moyens d'observation. Mais il propose une explication malheureuse en attribuant ce phénomène à des planètes très-voisines du Soleil.

Ces lettres excitèrent vivement l'attention de Galilée; il reconnut aussitôt l'intérêt, mais aussi les difficultés de ce sujet. Il se mit donc à l'œuvre, et, après quelques mois d'observations, il fut en état de donner la véritable théorie. Il reconnut que les taches sont adhérentes au corps solaire, et que leur translation apparente est due au mouvement de rotation de cet astre lui-même. Il était alors très-difficile d'arriver à cette conclusion, car la lunette de Galilée, la seule connue à cette époque, ne permet pas l'emploi du micromètre; on ne pouvait donc prendre les positions que d'une manière fort inexacte, et les mesures ne devinrent précises qu'à l'époque où l'on commença à étudier les images projetées sur un écran à l'aide de la lunette, ce que Scheiner fit le premier, et Castelli après lui.

([1]) Voir la première lettre de Scheiner à Velser. C'est la première publication qui ait été faite sur ce sujet. Elle est intitulée : *Apellis post tabulam latentis tres epistolæ de maculis solaribus ad Marcum Velserum* (1611).

Le fait matériel de la découverte des taches n'était qu'une question de temps et de hasard; mais il appartenait au génie de découvrir la théorie véritable, à la patience attentive et persévérante d'étudier les phénomènes. Sous le rapport du génie, Galilée est sans rival; sous le rapport des observations, Scheiner a bien mérité de la science. Plus tard, dans l'ardeur de la controverse, on l'a accusé de plagiat; mais le témoignage de Galilée suffit abondamment pour répondre à cette accusation (¹). On doit à la persévérance toute germa-

---

(¹) L'étonnement et les hésitations de Galilée se manifestent dès la première réponse qu'il adressa à Marc Velser; il ne l'écrivit cependant que trois mois après avoir reçu l'opuscule de Scheiner. Nous lui devons cette justice de dire qu'il eut bien plus de modération que tous ses amis. Ceux-ci se laissèrent entraîner par leur admiration passionnée, au point de dépasser toutes les limites des convenances : ils allèrent jusqu'à déclarer qu'il était impossible à personne de faire de semblables découvertes, car les cieux étaient réservés à Galilée! Comment admettre qu'il ait gardé un silence aussi absolu et aussi prolongé sur une découverte de cette importance, lui qui apportait un soin si jaloux à revendiquer toutes celles qui lui appartenaient, au point de recourir aux anagrammes et aux logogriphes pour en conserver la priorité. Nous le croyons cependant sur parole, en nous contentant de laisser de côté les exagérations calomnieuses de ses amis.

Scheiner découvrit les taches en cherchant à mesurer le diamètre solaire (*Rosa Ursina*, p. 71). Il avait fait construire une lunette avec des lentilles d'un verre fortement coloré; il y renonça plus tard lorsqu'il eut la pensée d'adapter un simple verre coloré à l'oculaire d'une lunette ordinaire. Ses nombreuses recherches sont consignées dans un Recueil intitulé : *Rosa Ursina*, dédié, suivant l'usage du temps, au prince Orsini, qui avait fait les frais de l'impression. Cet ouvrage, tant décrié par les contemporains, contient sans doute bien des choses inutiles mêlées à de précieuses recherches; mais que ne pardonne-t-on pas à Kepler? C'était la faute de l'époque et du pays. Du reste, la postérité a été plus juste. De la Lande a écrit ces mémorables paroles : « Quoi qu'il en puisse être de celui à qui le hasard a fait voir les taches pour la première fois, il est sûr que personne ne les observa si bien et n'en donna la théorie astronomique d'une manière aussi complète que Scheiner. » (*Astr.*, t. III, n° 3227.) — Hévélius le cite avec les plus grands éloges : « *Incomparabilis et omnigenæ eruditionis virum.... ut in hac materia omnibus palmam quasi præripuisse dici possit.* » (*Selenographia*, p. 82.)

Il est regrettable que nous n'ayons pas réussi à trouver ses manuscrits, que nous avons cherchés à la demande de M. Wolf de Zurich.

nique de Scheiner une longue suite d'observations pleines de détails intéressants, et qui ont été dans ces derniers temps appréciées à leur juste valeur. Il employa le premier les verres colorés et le système de projection par la lunette. Il perfectionna ce procédé d'après les conseils du P. Grienberger et construisit ainsi un appareil qui est la première forme de l'équatorial moderne.

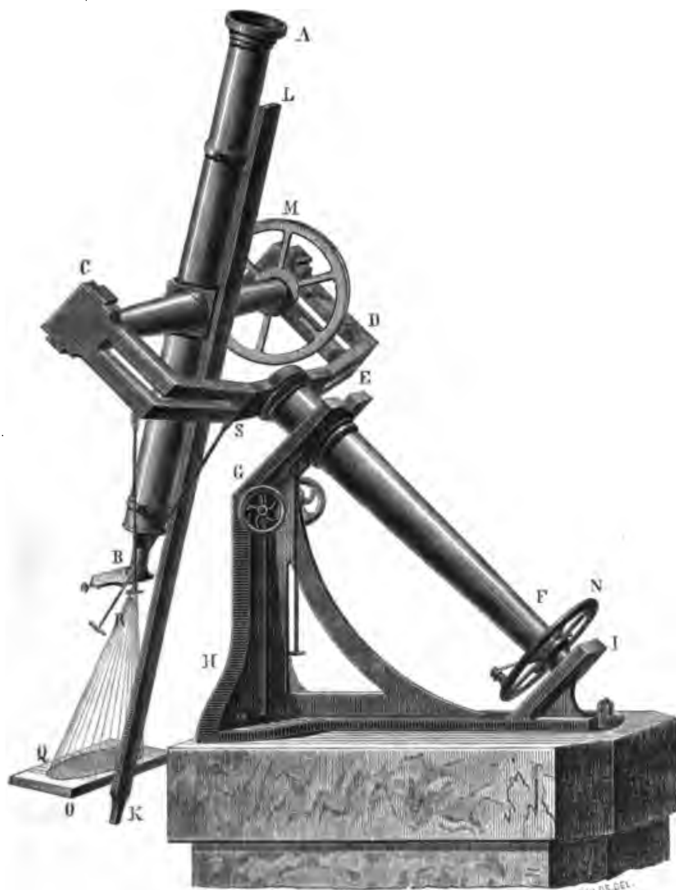
§ IV. — *Moyen d'observer les taches.*

L'observation des taches par voie de projection avec une lunette est assez commode et assez exacte pour que nous en donnions la description. Au volet d'une chambre obscure on fait une ouverture un peu plus grande que l'objectif; on place la lunette dans la direction des rayons solaires, et l'on déplace l'oculaire en l'écartant de l'objectif, jusqu'à ce que l'image, projetée sur un écran blanc, soit nettement terminée sur ses bords; les taches, s'il y en a, ne tarderont pas à apparaître bien nettes et bien définies.

Les images projetées par une lunette sont renversées par rapport à l'image qu'on verrait en observant directement dans la lunette elle-même. Si donc on se sert d'une lunette astronomique dans laquelle l'image est renversée, la projection sera directe, c'est-à-dire que, sur l'écran, le nord et le sud, l'est et l'ouest seront disposés comme dans le ciel : on verra donc les taches entrer sur le disque solaire par le bord oriental pour aller sortir du côté de l'ouest. Le contraire aura lieu si l'on emploie une lunette de Galilée ou une lunette terrestre; ces instruments redressant l'image donneront par projection une image renversée, dans laquelle on verra les taches décrire leurs trajectoires en sens inverse de leur mouvement réel.

Les observatoires emploient maintenant pour ces projections de grands instruments qui servent également à photographier le Soleil. La *fig.* 2 représente l'appareil employé

Fig. 2.



au Collége Romain, où chaque jour on observe les taches, lorsque le temps le permet. M. Carrington a employé un procédé semblable à l'observatoire de Redhill. Voici la description de la machine :

AB, lunette portant, par le moyen de la barre LK, la plan-

chette QO, sur laquelle doit se faire la projection; EF, axe polaire incliné sous l'angle de la latitude, portant deux branches CD, sur lesquelles repose l'axe de la lunette; GHI, support de fonte sur lequel repose tout l'appareil, et fixé sur un pilier en maçonnerie; M et N sont les cercles de déclinaison et d'ascension droite; RS est une tige de fer puissante qui sert à fixer la lunette.

Cet instrument est relié à un puissant mouvement d'horlogerie qui communique au cercle horaire un mouvement de rotation uniforme, calculé de manière à lui faire décrire une circonférence entière en vingt-quatre heures ([1]). La lunette, entraînée dans ce mouvement, suit constamment le Soleil, et la position des différents points de l'image demeure absolument fixe sur l'écran; les dessins se font ainsi plus facilement, plus rapidement et avec plus d'exactitude. Comme ces instruments se trouvent dans tous les observatoires, nous nous abstenons d'en donner une description plus détaillée.

Cet appareil étant solidement établi, on peut y adapter tous les instruments nécessaires pour l'étude du Soleil, chambres photographiques, spectroscopes, etc. Il est abrité sous un dôme mobile dont l'ouverture est garnie de rideaux en drap noir, de sorte qu'on n'y reçoit d'autre lumière que celle qui traverse la lunette. Cette disposition nous paraît avantageuse, et nous l'employons avec succès.

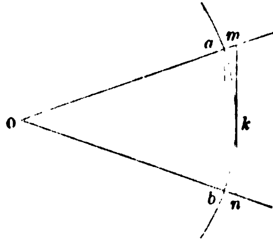
Lorsque les projections se font sur une grande échelle, et qu'elles sont destinées à des recherches de précision, il faut faire subir aux mesures une correction qui peut devenir importante. Les rayons sortis de l'oculaire vont former une image dont les différents points se trouvent en réalité sur une

---

([1]) Cette partie de la machine n'est pas représentée dans la figure.

surface sphérique *akb* (*fig.* 3), ayant son centre en O, tandis que le dessin se produit sur un plan tangent *mn*, ou plutôt

Fig. 3.



sur le plan *ab*, si l'on met au point le bord du Soleil. La différence entre la corde *ab* et la tangente *mn* n'est pas négligeable, et cette cause d'erreur n'avait pas échappé à Scheiner; du reste, cette méthode ne peut servir que pour des recherches générales; lorsqu'on veut obtenir les détails avec précision, il faut employer les mesures micrométriques. Ces observations ne sont cependant pas faciles : nous expliquerons plus loin la disposition et l'usage des instruments qu'on emploie dans cette étude.



CHAPITRE II.

LOIS FONDAMENTALES DU MOUVEMENT DES TACHES.

§ I. — *Révolution des taches.*

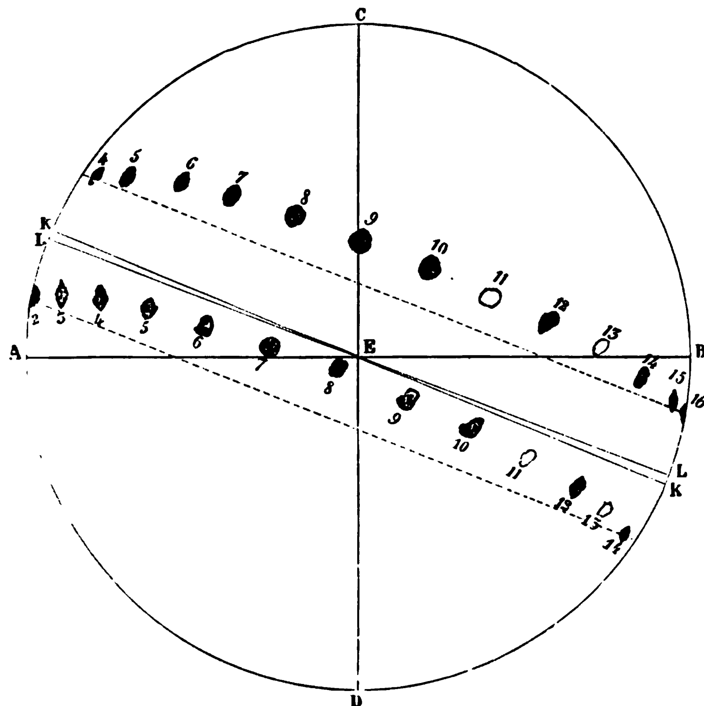
1° En général, les taches se présentent sur le bord oriental du Soleil, traversent le disque en suivant des lignes obliques par rapport au mouvement diurne et au plan de l'écliptique, et, après quatorze jours environ, elles disparaissent au bord occidental. Il n'est pas rare de voir une même tache, après être restée invisible pendant une période de quatorze jours, apparaître de nouveau au bord oriental pour faire une seconde, quelquefois une troisième et même une quatrième révolution; mais, plus généralement, elles se déforment et finissent par se dissoudre avant de sortir du disque, ou pendant qu'elles sont du côté opposé.

2° Lorsque sur le disque solaire paraissent simultanément plusieurs taches, elles décrivent, dans le même temps, des trajectoires semblables et sensiblement parallèles, quoiqu'elles soient à des latitudes très-différentes. Il faut en conclure qu'elles ne sont pas indépendantes, comme seraient des satellites, mais qu'elles se trouvent sur la surface du Soleil, et qu'elles sont entraînées par son mouvement de rotation; de plus, si les taches étaient des astres indépendants, il faudrait en dire autant des facules, qui sont assujetties au même mouvement de translation, hypothèse absurde; car,

comme le disait si bien Galilée, on ne peut pas supposer qu'il existe autour du Soleil des astres plus brillants que le Soleil lui-même.

3° Si l'on note chaque jour sur le même dessin la position des taches, on voit que leur mouvement apparent est plus rapide auprès du centre, tandis qu'il devient très-lent au bord du disque solaire. Nous donnons dans la *fig.* 4 les tra-

Fig. 4.



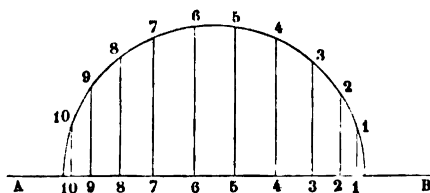
jectoires de deux taches observées par Scheiner, du 2 au 14 mars 1627.

Les deux lignes KK, LL représentent la projection de l'écliptique sur le disque solaire au commencement et à la fin des observations; AB est le parallèle céleste, CD le cercle de

déclinaison. Nous devons avertir que Scheiner observait avec une lunette de Galilée donnant par projection des images renversées : les taches semblent donc entrer à l'ouest pour aller sortir du côté de l'est. Les endroits ponctués indiquent des lacunes dues à la présence des nuages. Les taches sont nettement terminées, les ombres et les pénombres parfaitement tranchées. On peut juger de la courbure des trajectoires par leurs cordes. On voit facilement qu'elles n'ont pas toujours décrit le même espace dans des temps égaux.

Mais ces différences ne sont qu'apparentes, et elles résultent de ce que le mouvement nous paraît avoir lieu sur un plan, tandis qu'en réalité il a lieu sur un cercle parallèle à l'équateur solaire; nous projetons ce parallèle, et avec lui les positions successivement occupées par les taches, sur un plan perpendiculaire au rayon visuel. Pour représenter le phénomène, traçons une demi-circonférence, divisons-la en un certain nombre de parties égales, et de chacune de ces divisions abaissons des perpendiculaires sur le diamètre AB (*fig.* 5); nous partagerons ainsi le diamètre en un certain

Fig. 5.



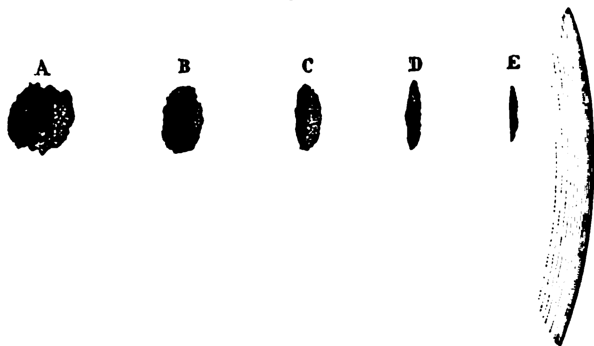
nombre de parties inégales, mais qui sont cependant les projections d'arcs égaux entre eux, et ces projections sont d'autant plus petites que les arcs correspondants se rapprochent davantage de l'extrémité du diamètre. En employant une construction semblable, Galilée montra que les taches ne

peuvent être des corps détachés du Soleil et éloignés de sa surface, car le rayon du parallèle solaire satisfaisait seul au calcul des translations diurnes.

§ II. — *Changement de forme des taches.*

1° Les taches, en s'approchant du bord, perdent leur forme arrondie, deviennent ovales, puis se rétrécissent au point de devenir presque linéaires; on peut en juger par les figures amplifiées que nous reproduisons ici (*fig.* 6).

Fig. 6.



Ces changements sont encore de simples apparences dues à un effet de perspective; on les explique de la même manière que le ralentissement apparent. Mais ce phénomène prouve encore que les taches sont adhérentes à la surface du Soleil; car, dans l'hypothèse contraire, il faudrait les attribuer à des corps très-aplatis, ce qui serait contraire à tout ce que nous connaissons de la forme propre aux corps célestes. Galilée les compara à des nuages, plus tard Scheiner les regarda comme des cavités. Nous verrons bientôt à quoi il faut s'en tenir.

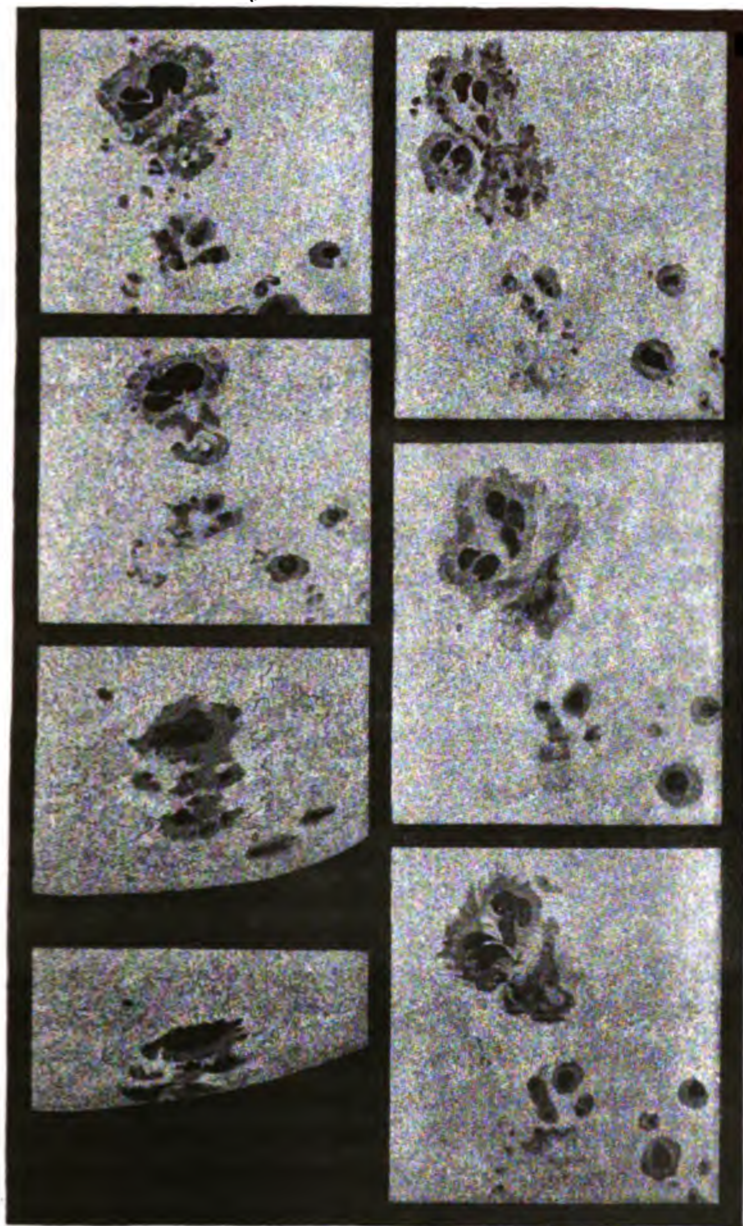
2° Outre ces déformations apparentes, il y en a de réelles. La forme des taches change quelquefois d'une manière très-notable, non-seulement d'un jour à l'autre, mais dans l'espace de quelques heures. En voici un exemple : la *fig.* 7 représente les transformations d'un groupe de taches observées par M. Rutherfurd du 19 au 26 septembre 1870. On voit d'abord une tache simple apparaissant sur le bord du disque; vingt-quatre heures plus tard, le 20 septembre, elle paraît plus large, mais c'est un simple effet de perspective, et elle conserve toujours la forme polygonale; le 21, le noyau se divise en deux cercles incomplets réunis entre eux, et la forme générale ressemble à celle d'une lemniscate; le lendemain, les deux cercles sont presque complets, et l'un d'eux est traversé par une bande lumineuse; les jours suivants, les deux parties se séparent de plus en plus; le 24, elles se subdivisent à leur tour, et le 26 nous trouvons quatre noyaux principaux entourés de plusieurs autres plus petits et moins distincts.

Quelquefois, au contraire, plusieurs taches se réunissent et se confondent en une seule; les observations que nous citerons dans la suite en fourniront des exemples nombreux et frappants. Ces changements de forme influent beaucoup sur le mouvement; la régularité géométrique indiquée ci-dessus en est profondément troublée, et c'est ce qui empêcha les premiers observateurs de déterminer avec précision la durée de la rotation solaire.

§ III. — *Variations annuelles dans le mouvement apparent des taches.*

3° Les trajectoires décrites par les taches varient avec la saison : au mois de mars, ce sont des ellipses très-allongées

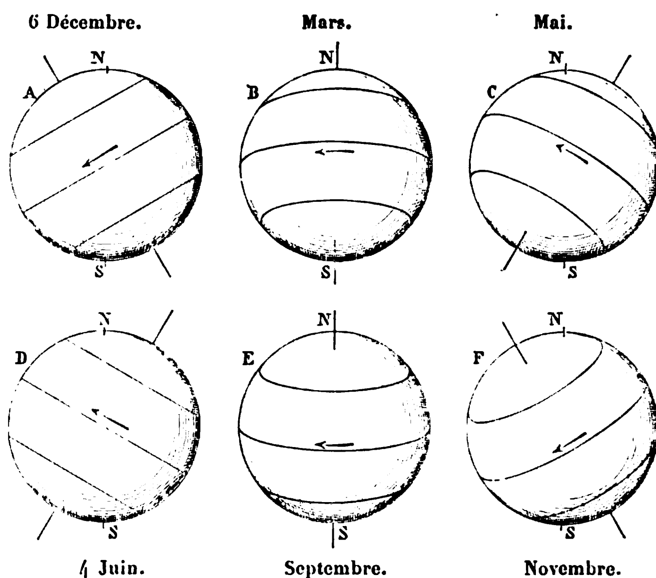
Fig. 7.



Groupe de taches solaires avec leurs variations successives, photographié par M. Rutherfurd les 19, 20, 21, 22, 23, 24 et 26 septembre 1870.

tournant leur convexité vers le nord, le grand axe de l'ellipse étant presque parallèle à l'écliptique (*fig.* 8, B). Après cette époque, la courbure des ellipses diminue graduellement, en même temps qu'elles s'inclinent sur l'écliptique comme dans la *fig.* 8, C, en sorte qu'au mois de juin elles se trouvent transformées en lignes droites (*fig.* 8, D). De juin à sep-

Fig. 8.



tembre, les courbes elliptiques reparaissent, mais leur position est inverse de la précédente (*fig.* 8, E); puis, en suivant des phases inverses, elles repassent par la courbe allongée (*fig.* 8, F), et prennent la ligne droite (*fig.* 8, A), pour revenir enfin, au bout d'un an, à la forme B. Le point N est le pôle nord de l'écliptique. Dans cette figure, les courbures et les inclinaisons ont été un peu exagérées, de manière à mieux faire comprendre leurs variations.

Toutes ces formes des trajectoires apparentes sont simple-

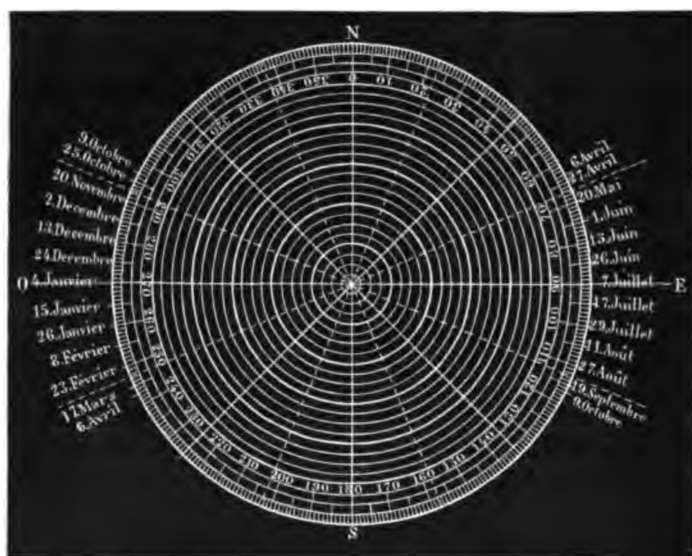
ment des effets de perspective. En réalité, les taches décrivent des parallèles à l'équateur solaire : ce sont ces parallèles que nous projetons à chaque instant sur un plan perpendiculaire au rayon visuel qui passe par l'œil de l'observateur et par le centre du globe solaire. Ces projections doivent nécessairement changer de forme à mesure que l'observateur se déplace; elles nous apparaissent sous des aspects différents, suivant la position que la Terre occupe par rapport à l'équateur solaire. Lorsqu'elle est à l'un de ses nœuds, c'est-à-dire à l'un des points où l'écliptique coupe l'équateur solaire, tous les parallèles se projettent suivant des lignes droites, et les trajectoires apparentes des taches sont rectilignes. C'est ce qui arrive lorsque la longitude du Soleil est de 74°30′ et 254°30′, c'est-à-dire le 4 juin et le 6 décembre. Lorsqu'au contraire la Terre se trouve au-dessus ou au-dessous de l'équateur solaire, les trajectoires se projettent suivant des ellipses, et ces courbes sont d'autant plus prononcées, que nous sommes plus éloignés de ce plan. Le maximum de courbure aura lieu pour des longitudes différant de 90 degrés de celles que nous venons d'indiquer pour les nœuds.

Nous venons d'examiner la position des taches par rapport à l'écliptique; nous pourrions aussi examiner les relations qu'elles ont avec l'équateur de la sphère céleste. Comme ces deux grands cercles sont inclinés l'un sur l'autre et inclinés sur l'équateur solaire, il en résulte que la ligne qui représente l'équateur solaire change de direction d'un jour à l'autre d'une manière considérable. On détermine toujours la position des points observés par rapport au parallèle du mouvement diurne de la sphère céleste : il est donc utile de pouvoir déterminer chaque jour l'angle que fait ce parallèle avec le grand axe de la projection de l'équateur solaire. Pour faciliter cette recherche, nous mettons sous les yeux du lecteur une

Table qui donne, avec une approximation suffisante, la valeur de cet angle pour tous les jours de l'année. Il est compté en partant du point le plus boréal du disque solaire et en allant vers l'est; si l'image est renversée, c'est-à-dire si l'on observe directement dans une lunette astronomique, ou bien si l'on étudie la projection due à une lunette de Galilée ou à une lunette terrestre, on devra compter les angles à partir du point qui semble correspondre au sud en allant vers l'ouest.

A la Table nous joignons une figure (*fig.* 9) qui donne la

Fig. 9.



valeur du même angle d'une manière approchée, et qui fait connaître la direction du diamètre équatorial dans les différentes saisons. On suppose que l'observateur regarde la projection en tournant le dos au Soleil : les quatre points cardinaux sont donc disposés dans le même ordre que sur une carte de géographie. Les dates ont été inscrites de 5 degrés

en 5 degrés pour les parties est et ouest; il sera facile d'y suppléer pour le reste de la circonférence ([1]).

([1]) La table suivante a été calculée pour l'année 1873; elle peut cependant servir pour les autres années lorsqu'on ne tient pas à avoir une grande approximation, l'erreur due aux années bissextiles ne dépassant jamais une fraction de degré assez faible. Elle est toujours suffisante pour les constructions graphiques.

Table des angles de position de l'équateur solaire

JANVIER.		FÉVRIER.		MARS.		AVRIL.		MAI.		JUIN.	
1	91°36′	1	77°26′	1	68°15′	1	63°42′	1	65°51′	1	74°40′
2	91.07	2	77.01	2	68.01	2	63.41	2	66.02	2	75.03
3	90.38	3	76.37	3	67.48	3	63.40	3	66.14	3	75.27
4	90.09	4	76.13	4	67.35	4	63.39	4	66.25	4	75.51
5	89.40	5	75.51	5	67.20	5	63.39	5	66.37	5	76.15
6	89.09	6	75.29	6	67.07	6	63.40	6	66.49	6	76.39
7	88.40	7	75.07	7	66.54	7	63.40	7	67.02	7	77.03
8	88.11	8	74.45	8	66.42	8	63.41	8	67.15	8	77.27
9	87.43	9	74.23	9	66.30	9	63.42	9	67.29	9	77.51
10	87.15	10	74.00	10	66.18	10	63.43	10	67.44	10	78.16
11	86.47	11	73.39	11	66.07	11	63.44	11	67.59	11	78.42
12	86.18	12	73.18	12	65.56	12	63.46	12	68.15	12	79.08
13	85.50	13	72.58	13	65.46	13	63.49	13	68.31	13	79.34
14	85.22	14	72.38	14	65.37	14	63.52	14	68.47	14	80.00
15	84.54	15	72.19	15	65.28	15	63.55	15	69.04	15	80.26
16	84.26	16	72.00	16	65.19	16	63.59	16	69.21	16	80.52
17	83.58	17	71.40	17	65.10	17	64.04	17	69.38	17	81.18
18	83.31	18	71.21	18	65.01	18	64.08	18	69.56	18	81.45
19	83.04	19	71.02	19	64.52	19	64.13	19	70.14	19	82.11
20	82.37	20	70.43	20	64.44	20	64.18	20	70.33	20	82.37
21	82.10	21	70.24	21	64.36	21	64.24	21	70.52	21	83.02
22	81.43	22	70.07	22	64.28	22	64.31	22	71.11	22	83.28
23	81.17	23	69.50	23	64.21	23	64.39	23	71.30	23	83.54
24	80.51	24	69.35	24	64.14	24	64.47	24	71.50	24	84.21
25	80.25	25	69.16	25	64.08	25	64.56	25	72.10	25	84.49
26	79.59	26	69.00	26	64.03	26	65 04	26	72.30	26	85.17
27	79.33	27	68.44	27	63.59	27	65.13	27	72.51	27	85.44
28	79.07	28	68.29	28	63.54	28	65.21	28	73.12	28	86.11
29	78.42			29	63.50	29	65.30	29	73.33	29	86.38
30	78.17			30	63.47	30	65.40	30	73.55	30	87.06
31	77.52			31	63.44			31	74.17	31	

pour l'année 1873, *comptés du nord vers l'est.*

JUILLET.		AOUT.		SEPTEMBRE.		OCTOBRE.		NOVEMBRE.		DÉCEMBRE.	
1	87°.35′	1	101°.06′	1	111°.14′	1	116°.02′	1	114°.29′	1	105°.56′
2	88.04	2	101.29	2	111.29	2	116.06	2	114.18	2	105.31
3	88.32	3	101.52	3	111.43	3	116.09	3	114.07	3	105.07
4	88.58	4	102.15	4	111.56	4	116.12	4	113.55	4	104.43
5	89.26	5	102.38	5	112.11	5	116.14	5	113.43	5	104.18
6	89.54	6	103.02	6	112.24	6	116.16	6	113.31	6	103.54
7	90.22	7	103.26	7	112.37	7	116.17	7	113.18	7	103.29
8	90.50	8	103.49	8	112.50	8	116.19	8	113.05	8	103.04
9	91.17	9	104.10	9	113.03	9	116.20	9	112.52	9	102.38
10	91.44	10	104.31	10	113.16	10	116.21	10	112.36	10	102.11
11	92.10	11	104.52	11	113.29	11	116.20	11	112.22	11	101.44
12	92.37	12	105.13	12	113.40	12	116.20	12	112.08	12	101.17
13	93.04	13	105.34	13	113.50	13	116.19	13	111.53	13	100.50
14	93.30	14	105.54	14	114.00	14	116.17	14	111.37	14	100.22
15	93.57	15	106.14	15	114.10	15	116.15	15	111.20	15	99.55
16	94.24	16	106.35	16	114.20	16	116.12	16	111.02	16	99.27
17	94.50	17	106.55	17	114.29	17	116.09	17	110.44	17	98.59
18	95.16	18	107.16	18	114.38	18	116.06	18	110.25	18	98.30
19	95.42	19	107.34	19	114.47	19	116.02	19	110.07	19	98.01
20	96.08	20	107.52	20	114.56	20	115.57	20	109.49	20	98.32
21	96.34	21	108.10	21	115.05	21	115.52	21	109.31	21	97.04
22	97.00	22	108.28	22	115.13	22	115.47	22	109.11	22	96.36
23	97.26	23	108.46	23	115.21	23	115.42	23	108.50	23	96.08
24	97.51	24	109.03	24	115.28	24	115.36	24	108.30	24	95.40
25	98.17	25	109.20	25	115.34	25	115.29	25	108.10	25	95.10
26	98.42	26	109.37	26	115.40	26	115.22	26	107.49	26	94.40
27	99.07	27	109.54	27	115.45	27	115.14	27	107.28	27	94.11
28	99.32	28	110.10	28	115.50	28	115.06	28	107.05	28	93.41
29	99.57	29	110.26	29	115.54	29	114.57	29	106.42	29	93.10
30	100.22	30	110.43	30	115.58	30	114.48	30	106.20	30	92.39
31	100.48		110.59			31	114.39			31	92.08

§ IV. — *Autres propriétés des taches.*

1° Les taches ne se montrent pas indifféremment sur tous les points du disque. Elles sont peu nombreuses dans le voisinage immédiat de l'équateur, et très-rares dans les latitudes supérieures à 35 ou 40 degrés. Elles se montrent en plus grande quantité dans deux zones symétriques qu'on a appelées *zones royales*, comprises entre 10 et 30 degrés de latitude héliocentrique.

2° Le nombre des taches est très-variable. Quelquefois elles sont assez nombreuses pour qu'on puisse, par une seule observation, reconnaître les zones qui les contiennent habituellement. Quelquefois, au contraire, elles sont si rares qu'une année entière peut s'écouler sans qu'on en voie une seule. On a reconnu une régularité remarquable dans la manière dont se succèdent ces périodes, que nous étudierons dans la suite de notre travail.

Lorsqu'on étudie les taches, il est utile et intéressant d'en évaluer le nombre et la grandeur, mais il y a dans cette appréciation beaucoup d'arbitraire. On les distingue ordinairement en groupes composés de taches et de points; mais souvent un observateur comptera plusieurs groupes là où un autre n'en verra qu'un seul, le premier appellera une petite tache ce que l'autre aura pris pour un point. Pour avoir une idée exacte de la surface totale que recouvrent les taches à un moment donné, il faut évaluer l'aire de chacune d'elles; c'est ce qu'a fait M. W. de la Rue pour les observations de Kew et pour celles de M. Carrington, mais c'est un travail très-long : encore ne peut-on le faire que sur des photographies ou sur des dessins parfaitement exécutés. Pour cette mesure, on se sert d'une lame de verre sur laquelle sont tracés

des réseaux croisés de lignes très-fines et très-rapprochées, disposées comme celles d'un papier quadrillé. On compte le nombre des petits carrés contenus dans une tache, en évaluant séparément le noyau, l'ombre et la pénombre ; puis on évalue le rapport d'un de ces carrés avec l'image du Soleil, et l'on en conclut la fraction de la surface totale qui est recouverte de taches. Il faut cependant tenir compte de la déformation qui a eu lieu près des bords, et cette correction dont l'importance dépend de la distance au centre entraîne des calculs pénibles ; mais dans l'état actuel de la science, et surtout pour les dessins ordinaires, on peut faire abstraction de la forme sphérique du Soleil et se contenter de déterminer le rapport entre la surface des taches et celle de la projection solaire, en prenant les mesures au moment où les taches sont assez loin des bords. En pratique, il sera bon d'employer dans les descriptions les termes de convention qui abrégent le discours. On appelle *nucléaires* les taches rondes ayant un noyau ; les grandes, désignées par la lettre N, sont celles dont le diamètre dépasse 30 secondes ; les petites, désignées par la lettre *n*, sont celles inférieures à 30 secondes. Un assemblage de points sera désigné par *p* ou *pp*, suivant leur nombre ; si le nombre des points est très-considérable, on emploiera les lettres *mp*. Ainsi un groupe composé d'une grande tache nucléaire et de plusieurs points sera désigné, suivant les cas, par l'une des deux notations suivantes N*npp* ou N*nmp* [1].

Lorsque les taches ont la forme circulaire, on les mesurera très-exactement avec une règle divisée en millimètres ; on

---

[1] *Voir*, pour plus de détails, le *Bulletin de l'Observatoire du Collége Romain*, septembre 1873. Nous donnons quelques indications pour les amateurs : les astronomes n'ont pas besoin de ces renseignements.

fera usage du verre quadrillé pour les taches irrégulières dont la forme générale ne se rapproche d'aucune figure géométrique. Sans doute, ces mesures ne sont qu'approchées, mais, si l'on compare les résultats obtenus avec la surface totale de la projection solaire, on se fera une idée assez exacte de la grandeur que l'on veut mesurer. Supposons, par exemple, que l'image du Soleil ait un rayon de $121^{mm},5$; sa surface sera de 46 377 millimètres carrés, et, en prenant pour unité la millionième partie de la surface de projection, chaque millimètre carré correspondra à 21,5622 parties ; on pourra donc toujours calculer la grandeur relative des taches par rapport à celle du Soleil, en se rappelant que la surface de projection est le quart de la surface sphérique totale.

3° Lorsqu'on cherche à déterminer la durée de la rotation solaire par le retour des taches, on trouve de grandes anomalies, dont l'explication est restée longtemps inconnue. On trouve en moyenne qu'une tache revient (du moins en apparence) à sa position primitive au bout de vingt-sept jours et un tiers environ ; mais il y a dans cette évaluation une cause d'erreur, dont il faut tenir compte. Pendant ce temps, la Terre n'est pas restée immobile ; elle a décrit sur son orbite un arc d'environ 25 degrés, dans le sens même de la rotation solaire. Au moment où une tache achève sa rotation apparente, elle a donc décrit un cercle complet, et, depuis deux jours à peu près, elle a commencé une seconde révolution. En effectuant la correction exigée par cette circonstance, on trouvera pour durée véritable de la rotation solaire vingt-cinq jours et demi environ.

Mais ce n'est encore là qu'une approximation regardée comme insuffisante par les savants : aussi emploient-ils des méthodes plus rigoureuses ; d'ailleurs le contour apparent du Soleil ne coupe pas toujours en deux parties égales le cercle

que décrit une tache : de là une nouvelle irrégularité dans le mouvement apparent. De la combinaison de ces mouvements il résulte qu'au lieu de décrire une ellipse simple, un point de la surface du Soleil, observé de la Terre, décrit une ellipse dont les axes varient constamment de grandeur et de position.

§ V. — *Coup d'œil sur les hypothèses émises relativement à la nature des taches.*

Scheiner avait d'abord regardé les taches comme des satellites tournant autour du Soleil, opinion insoutenable, bientôt abandonnée par son auteur, et qu'on a cependant essayé de faire revivre. Après avoir longtemps gardé un silence prudent, Galilée les attribua à des nuages ou à des fumées flottant dans l'atmosphère solaire : c'était la meilleure conclusion qu'on pût tirer des observations peu précises qu'on avait pu faire. Cette opinion eut longtemps l'approbation générale ; elle a même été reprise de nos jours par des savants très-respectables, malgré les difficultés sérieuses qu'elle présente. Dans les dernières années de sa vie, Scheiner annonça que les taches étaient situées au-dessous du niveau général de la surface solaire, mais sans faire connaître avec des détails suffisants les faits sur lesquels reposait cette opinion.

Quelques astronomes, et entre autres le célèbre de la Lande, crurent au contraire que c'étaient des montagnes dont les flancs plus ou moins escarpés auraient produit le phénomène de la pénombre ; opinion inconciliable avec le mouvement propre que les taches possèdent quelquefois d'une manière bien prononcée. Derham les attribue à des fumées sorties des cratères volcaniques du Soleil, opinion reprise et

soutenue dans ces derniers temps par M. Chacornac. Plusieurs savants, regardant le Soleil comme une masse liquide et incandescente, expliquaient les taches par d'immenses scories flottant sur cet océan de feu.

Un siècle s'était à peine écoulé depuis le moment où l'on aperçut les taches pour la première fois, qu'un astronome anglais, Wilson, faisait une découverte mémorable : il montrait avec évidence que les taches sont des cavités, et il donnait une première idée de la constitution véritable du Soleil en comparant à un nuage fortement éclairé la couche lumineuse que nous appelons la *photosphère.*

Toutes les opinions admises sur la nature des taches dépendent de la manière dont on se représente le Soleil luimême, sa nature et l'état de sa masse intérieure. Si on le compare à une lave liquide et incandescente, on est naturellement conduit à admettre que les taches sont formées par des scories solides et obscures flottant à la surface; si l'on suppose que la couche extérieure est gazeuse et constituée à peu près comme les nuages qui flottent dans notre atmosphère, on ne pourra employer le nom de *scorie* que dans un sens très-impropre, car alors les matières en question ne seraient pas solides : ce seraient des gaz lancés de l'intérieur du corps solaire qui, refroidis par l'expansion et se déposant à la surface extérieure, produiraient des régions moins brillantes qu'un effet de contraste ferait paraître obscures.

Ce n'est pas le moment de nous prononcer pour l'une de ces hypothèses. Ce choix serait prématuré, car il doit reposer sur l'étude attentive et détaillée des faits qui nous ont été révélés par l'observation. Continuons donc cette analyse, et nous verrons qu'elle nous conduira naturellement à des idées précises sur la constitution physique du Soleil et sur la nature des taches.

§ VI. — *Travaux d'Herschel.*

La découverte de Wilson a été le point de départ des grands travaux d'Herschel. Nous en dirons ici quelques mots seulement, car l'époque à laquelle vivait cet astronome touche de très-près à celle où il devient impossible de suivre l'ordre chronologique dans l'exposé des découvertes. W. Herschel était un homme de génie, mais il était par-dessus tout un observateur hors ligne. Il a vu tant de phénomènes à l'aide des puissants instruments qu'il avait construits de ses propres mains, il a si minutieusement décrit les merveilles qui lui étaient ainsi révélées, qu'il a laissé fort peu de chose à faire à ses successeurs pour ce qui regarde la simple observation télescopique. Seulement, ses instruments lui étant pour ainsi dire personnels, il en fut de même du langage qu'il dut créer pour s'exprimer; ce langage ne fut pas toujours compris, et c'est maintenant seulement qu'à l'aide d'instruments comparables aux siens nous pouvons juger de l'étendue de ses découvertes.

L'idée capitale d'Herschel reposait sur la découverte de Wilson. Il remarqua avec raison, comme l'avait fait cet astronome, que si les taches sont des cavités la matière lumineuse ne saurait être, à proprement parler, ni liquide ni gazeuse; car alors elle se précipiterait avec une effrayante rapidité pour remplir le vide, ce qui rendrait impossible la persistance des taches que nous voyons quelquefois durer pendant plusieurs révolutions. D'ailleurs les mouvements propres des taches prouvent que la photosphère n'est pas solide; on ne peut donc plus la comparer qu'aux brouillards et aux nuages, et elle doit être suspendue dans une atmosphère semblable à la nôtre : telle est, selon Herschel, la seule hypothèse qui puisse

expliquer les rapides variations dont nous sommes les témoins. Nous verrons cependant plus tard que ces phénomènes peuvent admettre une autre explication.

Dans son second Mémoire, Herschel poursuit cette étude avec une perspicacité digne de son génie. Malheureusement il se laisse séduire par l'idée de l'*habitabilité* du Soleil. Il lui fallut donc un noyau solide sur lequel pussent reposer ses habitants, et un moyen quelconque qui les protégeât contre les radiations de la photosphère. Pour cela, il suppose, au-dessus du noyau, une couche de nuages toujours contiguë à la photosphère qui l'enveloppe, et se déchirant en même temps qu'elle pour laisser apercevoir le noyau : hypothèses arbitraires, n'ayant aucun fondement dans l'observation, et conduisant à des explications qui sont en complet désaccord avec les principes de la Physique moderne.

Cependant les travaux d'Herschel contiennent tant de choses positives, tant d'idées justes, qu'ils ont fait faire de très-grands progrès à nos connaissances sur la véritable constitution du Soleil, et nous le prendrons souvent pour guide dans l'exposé que nous aurons à faire.

§ VII. — *Autres travaux sur la nature des taches.*

Nous n'avons rien dit des travaux des anciens astronomes, Hévélius, Cassini, Huyghens, Messier, de la Lande, etc.; leurs observations, quelque laborieuses qu'elles aient été, ont rendu peu de services à la science de la physique solaire, à cause de l'imperfection des instruments dont ils se servaient. Ils nous ont cependant transmis d'importants détails, et surtout ils ont réuni de précieux documents relatifs à la rotation du Soleil, au nombre et à la position des taches, à leurs di-

mensions et à leur distribution sur la surface du globe solaire, etc. On doit aux soins de M. Wolf, actuellement directeur de l'Observatoire de Zurich, un recueil aussi complet que possible de tous les travaux publiés jusqu'à ce jour sur le Soleil; cette collection, sous le titre de *Littérature solaire*, fait partie de ses *Mittheilungen über der Sonnenflecken;* nous renvoyons le lecteur à cet ouvrage pour toutes les connaissances historiques et bibliographiques relatives au sujet qui nous occupe.

Après avoir exposé sommairement les recherches faites par ceux qui nous ont précédés, nous arrivons aux travaux de nos contemporains, et là nous devons renoncer à suivre l'ordre historique pour nous attacher, autant que possible, à développer dans l'ordre logique les idées qui naissent de l'étude des faits. Nous aurons souvent à citer les savants modernes : les Herschel, Carrington, Warren de la Rue, Faye, Spörer, Zöllner, Wolf, Schwabe, Tacchini, Donati, Young, Respighi, Lockyer, Huggins, et la pléiade de ces savants zélés et patients qui, armés du spectroscope, ont fait des découvertes si inattendues. Contentons-nous de citer ici les noms que nous retrouverons souvent dans le courant de cet ouvrage. Nous nous permettrons de puiser largement dans nos propres travaux, toutes les fois surtout qu'il s'agira de choses qui nous appartiennent en propre, et lorsque nos recherches personnelles nous mettront à même de mieux éclairer le lecteur, en nous permettant de donner plus d'exactitude à la description des phénomènes.



CHAPITRE III.

NOUVELLES MÉTHODES D'OBSERVATION.

§ I. — *Oculaires hélioscopiques.*

La grande intensité de la lumière du Soleil a toujours été la principale difficulté à vaincre dans l'observation des phénomènes qui se passent à la surface de cet astre. L'emploi des verres fortement colorés est un moyen pour les lunettes ordinaires; mais, dans les grands instruments, ils se brisent ou se fondent avec la plus grande facilité. Pour remédier à cet inconvénient, on a longtemps employé des diaphragmes destinés à réduire l'ouverture de l'objectif; mais on perdait ainsi une partie des avantages que présentaient les grands instruments, et en même temps on diminuait beaucoup la netteté de l'image. Ce dernier résultat tient à un phénomène de diffraction, qui est d'autant plus sensible que l'ouverture du diaphragme est plus étroite. En effet, lorsqu'on observe une étoile avec une bonne lunette, l'image se réduit à un point; mais si l'objectif est muni d'un diaphragme, les choses se passent autrement : au lieu d'un point, on aperçoit un petit cercle d'autant plus grand que le diaphragme est plus petit. Dans les observations faites sur le Soleil, chaque point se comportera de la même manière et sera représenté par un cercle d'une certaine étendue; tous ces cercles empiétant l'un sur l'autre, il en résultera une image plate et confuse, dans laquelle il sera impossible de distinguer les détails.

Herschel avait éprouvé ces inconvénients : aussi aimait-il mieux employer des verres fortement colorés, en conservant toute l'ouverture de son télescope. Il essaya plusieurs autres moyens, et en particulier des liquides diversement colorés, par exemple de l'eau mélangée d'encre ; mais la chaleur produisait dans ces liquides des mouvements tumultueux, et il en résultait une grande confusion dans les images. Son fils, sir John, proposa d'employer un miroir concave fait en verre non étamé ; on obtiendrait ainsi, vu le faible pouvoir réflecteur du verre, une image encore trop vive pour être examinée à l'œil nu, assez faible cependant pour qu'on pût l'observer avec un verre coloré, malgré l'ouverture considérable de l'appareil. M. Chacornac a récemment employé ce procédé, avec un télescope non argenté. Foucault, au contraire, a proposé d'argenter la surface antérieure des objectifs de lunettes, et de regarder le Soleil à travers cette mince couche de métal. On assure que les images sont très-belles et très-agréables à l'œil : on serait ainsi arrivé à une idée semblable à celle de Scheiner, qui proposait de faire une lunette avec des verres colorés ; mais ces différents procédés exigent un instrument spécialement destiné au Soleil, et peu d'astronomes se décideront sans doute à sacrifier leur meilleur objectif. De plus, ils ont l'inconvénient de transmettre toujours à l'œil de l'observateur la même quantité de lumière : en pratique, il est utile qu'on puisse faire varier l'intensité lumineuse afin de mieux étudier les détails.

Il était donc important de trouver un moyen qu'on pût adapter facilement à tous les instruments. L'astronome anglais Dawes proposa de mettre le diaphragme, non à l'objectif, mais à l'oculaire ; pour cela, il recevait l'image sur une plaque d'ivoire doublée de métal, et regardait par un trou très-petit. J'ai souvent employé à cet usage une simple carte

de visite recouverte de céruse et percée d'un trou d'épingle; loin de brûler, elle ne se noircit même pas, malgré la grande quantité de chaleur qui se concentre au foyer d'un large objectif. Le seul inconvénient, c'est que le champ de vision devient très-étroit. Cet inconvénient n'est pourtant pas sans quelques compensations, car, la plus grande partie du disque étant cachée, l'œil est bien plus à son aise pour étudier les détails.

Cependant, même avec de petits diaphragmes, il faut toujours employer un verre coloré. Les meilleurs sont ceux qu'on appelle des verres *gradués*, formés de deux pièces taillées en forme de coin : l'une est blanche, l'autre bleue; on les superpose simplement, car toutes les substances qui pourraient servir à les coller se gonflent par la chaleur et forment des bulles. En mettant ce verre gradué (*fig.* 10) dans

Fig. 10.

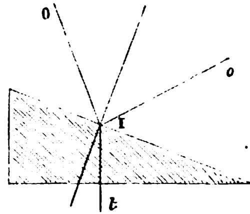


une monture qui glisse devant l'oculaire, on peut régler à volonté l'intensité de la lumière, ce qui présente de grands avantages.

Un excellent moyen a été proposé par sir John Herschel. Il consiste à employer la lumière réfléchie. On a essayé de produire cette réflexion à la surface d'une lame de verre très-fortement colorée; on évitait ainsi la réflexion sur la seconde face, et par conséquent on écartait une cause de trouble dans la formation de l'image; mais alors les rayons qui ne sont pas réfléchis sont absorbés; le verre s'échauffe, se déforme et finit par se briser. Herschel a évité tous ces inconvénients en adoptant la disposition suivante : un prisme

rectangulaire de cristal est disposé de manière que le rayon incident OI (*fig.* 11) vienne se réfléchir sur son hypoténuse;

Fig. 11.



les rayons qui pénètrent dans le cristal sortent perpendiculairement à la seconde face, suivant la direction I*t*, et l'on évite ainsi les réflexions intérieures qui seraient gênantes. Le prisme est fixé dans une monture à claire-voie (*fig.* 12),

Fig. 12.



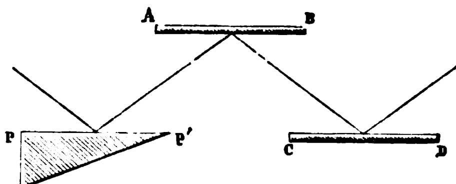
afin d'éviter l'élévation de température. Par cette disposition, l'appareil s'échauffe très-peu et la lumière est tellement affaiblie, qu'on peut se contenter d'un verre faiblement coloré.

§ II. — *Oculaires polariscopiques.*

Cependant le verre coloré subsiste toujours et empêche de voir le Soleil avec sa teinte véritable. Cet inconvénient disparaît dans l'oculaire polariseur imaginé par le P. Cavalleri de Monza. Nous nous servons d'un de ces hélioscopes construit à Milan par MM. Longoni et dell' Aqua. La lu-

mière est d'abord reçue sur un prisme PP′ semblable à celui d'Herschel (*fig.* 13), seulement l'incidence a lieu sous l'angle

Fig. 13.



de 36 degrés, sous lequel le verre polarise la lumière. De là les rayons viennent tomber sur un miroir de verre noir AB, parallèle au prisme : cette incidence a donc encore lieu sous l'angle de 36 degrés. Enfin la lumière vient subir une dernière réflexion en CD, toujours suivant l'angle de polarisation. Le prisme et le premier miroir sont fixés dans une position invariable l'un par rapport à l'autre ; mais le miroir CD est monté dans un tube qui tourne librement autour du rayon réfléchi ; de sorte qu'on peut amener le plan de réflexion de ce dernier miroir à faire un angle quelconque avec le plan de la réflexion précédente, c'est-à-dire avec le plan de polarisation. Si l'on dispose l'appareil de manière que cet angle soit droit, on affaiblit la lumière au point que l'œil peut la supporter sans inconvénient, même à l'époque où le Soleil est à sa plus grande hauteur. La lumière n'y disparaît pas complétement, mais ce serait inutile.

La *fig.* 14 représente cet oculaire réduit à un quart de sa grandeur naturelle.

M. Merz nous a envoyé un oculaire construit d'après les mêmes principes (*fig.* 15), dans lequel l'extinction de la lumière est complète, grâce à un quatrième réflecteur. Les surfaces sont parfaitement planes, mais le prisme est remplacé par un verre coloré, ce qui fait craindre que la chaleur ne

le brise. Cette disposition a d'ailleurs un grand avantage, c'est que le rayon sort parallèlement à l'axe de la lunette, ce qui est impossible dans l'autre système. Ces appareils présentent cependant un inconvénient : la course du porte-

Fig. 14



oculaire est quelquefois insuffisante, parce que la longueur du tube mobile est tout entière employée à produire ces trois ou quatre réflexions. Le P. Cavalleri, pour remédier à cet inconvénient, a placé en avant du prisme une lentille légè-

Fig. 15.



rement concave qui augmente la distance focale de l'objectif de la quantité dont elle se trouve diminuée par les zigzags que décrivent les rayons.

Ces hélioscopes sont assez coûteux, mais ils présentent bien

des avantages, et en particulier celui de pouvoir modérer à son gré l'intensité de la lumière. Cependant, malgré toutes les précautions qu'on prend pour garantir la vue des observateurs, et obtenir de bonnes images, il subsiste un inconvénient qu'on ne saurait éviter, c'est l'échauffement des objectifs et celui de la masse d'air contenue dans les tubes. Il en résulte des irrégularités très-sensibles dans les réfractions : aussi au bout de quelques minutes les images ne présentent plus la même netteté, et l'on est obligé d'interrompre l'observation pendant quelque temps pour que la température puisse s'abaisser. M. Nasmyth a proposé d'employer des lunettes sans tubes, comme celles de Huyghens. Ce procédé pourrait réussir pour les grands réflecteurs; pour les réfracteurs, on pourrait adopter des tubes à claire-voie : l'air circulant librement s'échaufferait beaucoup moins.

Nous recommandons aux observateurs d'éviter les verres rouges et les noirs; ils laissent passer beaucoup de chaleur, et leur couleur est fatigante pour l'organe de la vue. Les meilleures teintes sont les vertes, les jaunes, les bleues et celles qu'on appelle neutres.

§ III. — *Photographies solaires.*

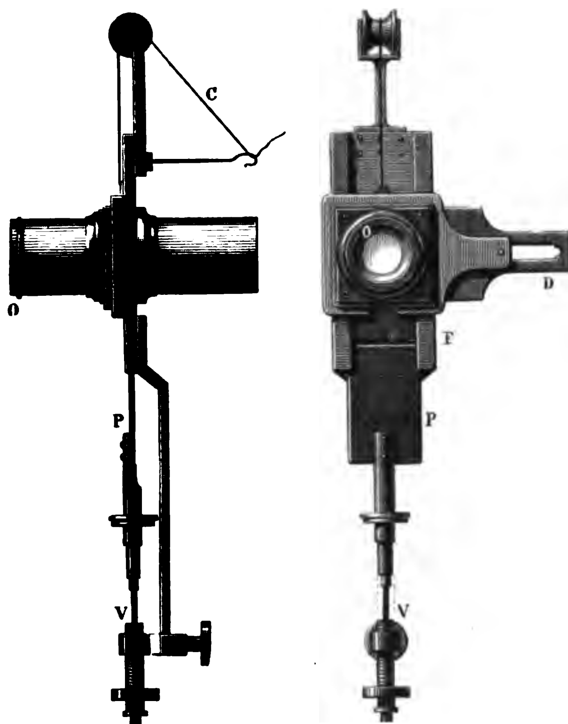
La Photographie a rendu de très-grands services, soit dans les observations ordinaires du Soleil, soit dans les éclipses. On obtient les épreuves photographiques avec le même appareil qui sert pour les projections; seulement on substitue à la planche une chambre noire, et l'on met au foyer deux fils croisés qui doivent servir à l'orientation de l'image.

La durée de l'exposition doit être tellement courte, qu'il faut pour la régler employer un appareil spécial. Il consiste

en une plaque métallique glissant dans une rainure, et portant une fente très-étroite, dont on peut faire varier la largeur à volonté. Au moment de l'opération, on lâche une détente; la plaque obéit à l'action d'un ressort, et la fente passe rapidement à travers le cône lumineux.

La *fig.* 16 représente l'oculaire que nous adaptons à notre

Fig. 16.



équatorial pour ces opérations. Il est semblable à celui de Kew, et nous l'avons fait construire par Dallmeyer à Londres. La lunette doit être portée par un mouvement d'horlogerie, quoiqu'à la rigueur on puisse la mouvoir à la main; de plus, elle doit avoir un chercheur assez puissant pour s'assurer

qu'au moment de l'opération la plaque est dans une position convenable.

O est l'oculaire positif, composé de lentilles achromatiques, destiné à former l'image ; P est la plaque glissant verticalement, munie d'une fente F et d'un diaphragme circulaire dans la partie supérieure ; D est une plaque glissant horizon-

Fig. 17.



talement, et percée de deux trous, l'un complétement libre, l'autre portant deux fils micrométriques croisés à angle droit ; V est un ressort en caoutchouc ou en spirale d'acier pour produire le mouvement de la plaque verticale ; C un cordon destiné à la retenir jusqu'au moment de l'opération. A l'extrémité O de l'oculaire, on fixe une boîte qui doit recevoir les

châssis portant le verre dépoli et les plaques sensibles : c'est la chambre noire des photographes. Sa forme est indifférente et dépend de la grandeur de l'image qu'on veut obtenir. La *fig.* 17 montre la disposition adoptée au Collége Romain; cette chambre noire est à la fois légère et commode; elle s'applique directement au tube de la lunette, sans qu'on ait besoin d'un appareil spécial comme dans la disposition adoptée à l'Observatoire de Kew.

L'opération se fait de la manière suivante : la plaque P étant disposée de manière que les rayons lumineux puissent parvenir au verre dépoli, on met au point comme à l'ordinaire; puis on soulève la plaque jusqu'à ce que la fente F soit tout entière au-dessus du cône lumineux, et on la retient dans cette position à l'aide du fil C. Lorsque la glace sensibilisée a été mise à la place du verre dépoli, on coupe le fil; la fente F passe rapidement dans le cône lumineux, l'impression est produite. On révèle ensuite l'image, et on la fixe par les procédés ordinaires.

On évalue à un centième de seconde au plus le temps nécessaire pour obtenir une bonne épreuve; mais cela dépend de plusieurs circonstances. Si l'exposition a été trop prolongée, les taches disparaissent et les bords manquent de netteté. Le diamètre de l'image dépend lui-même de la durée de l'exposition; si le temps est trop court, les bords sont mal tracés, on reconnaît avec évidence la forme sphérique du Soleil, et l'on peut juger de la forte absorption qu'exerce son atmosphère. La *fig.* 18 a été obtenue dans de semblables circonstances par M. Selvyn, en octobre 1860. (Voir aussi *fig.* 1 de Rutherfurd.)

Pour obtenir des épreuves parfaites, on doit prendre les précautions suivantes : 1° la surface du châssis doit être parfaitement noircie ou recouverte de velours noir afin d'éviter

les réflexions qui enverraient de la lumière sur la plaque sensible; 2° pour éviter la réflexion sur la seconde face du verre, on doit placer le côté recouvert de collodion, non pas vers l'objectif, mais vers le fond du châssis : pour cela, il faut une disposition particulière pour retenir le verre en place, et les plaques doivent être parfaitement exemptes de défauts.

Fig. 18.



Dans les observatoires où l'on peut sacrifier une lunette à ce travail, on adopte naturellement des dispositions qui rendent le travail plus facile : par exemple, on peut renfermer l'oculaire et la plaque dans une chambre noire placée sur le prolongement de la lunette et faisant corps avec elle : telle est la disposition adoptée à Kew, à Lisbonne et ailleurs.

Toutes les remarques que nous avons faites en parlant des projections obtenues au moyen d'un oculaire s'appliquent également aux photographies. L'image projetée subit toujours une déformation, et surtout, la surface focale n'étant jamais parfaitement plane, les différentes parties de l'objet ne peuvent pas se trouver au point en même temps. Si l'on voit le

centre avec netteté, le bord sera confus, et réciproquement. On remédie à cet inconvénient en supprimant l'oculaire et en opérant avec un objectif à long foyer. M. Porro a obtenu de très-grandes images avec sa lunette de 10 mètres. Pour l'éclipse de 1870, les astronomes américains avaient disposé une lunette ayant 127 millimètres de diamètre et 14 mètres de distance focale : ils obtenaient ainsi des images très-grandes et très-nettes; mais on n'a pas toujours entre les mains des instruments d'aussi grandes dimensions.

Le tube étant trop long pour qu'on puisse le rendre mobile, on le fixe soit horizontalement, soit dans la direction de l'axe du monde; puis on dirige la lumière solaire sur l'objectif à l'aide d'un héliostat dont le miroir est en verre non argenté, parfaitement plan. La lumière est ainsi affaiblie et les images sont admirables. On peut alors mesurer avec facilité le temps pendant lequel la plaque sensible est exposée à l'action de la lumière. Pour cela on donne au diaphragme qui porte la fente la forme d'un secteur suspendu en son centre, et pouvant osciller comme un pendule. En laissant tomber ce secteur de manière qu'il exécute une oscillation, on permettra à la lumière de traverser l'appareil pour aller impressionner le collodion. Connaissant la largeur de la fente et la durée d'oscillation du secteur, on pourra calculer la durée de l'exposition. Il est important que l'endroit où l'on opère soit protégé par un rideau en étoffe noire et épaisse afin d'éviter l'action de la lumière diffuse.

Dans les objectifs achromatiques ordinaires, le foyer chimique ne coïncide jamais avec le foyer optique, car on les dispose de manière à achromatiser les rayons auxquels l'œil est plus sensible, le rouge et vert; aussi faut-il chercher par tâtonnement la position où l'action de la lumière produit une image aussi nette que possible. La différence peut aller à

12 millimètres dans une lunette de $2^m,50$, et à 22 millimètres dans une lunette de $4^m,30$, et, même dans ce plan focal, la précision n'est jamais telle qu'on puisse employer de forts grossissements. Pour éviter tous ces inconvénients, M. Rutherfurd a fait construire un objectif dont les surfaces ont été corrigées spécialement pour les rayons chimiques; mais cet instrument ne peut servir que pour la photographie, il est absolument impropre aux observations optiques. M. de la Rue remplace les lentilles achromatiques par des réflecteurs paraboliques qui ont l'avantage de donner le même foyer pour les rayons de couleur et de nature différentes.

D'après une découverte importante que vient de faire M. Cornu, il est facile de transformer un objectif ordinaire en objectif photographique : il suffit de séparer les deux verres qui composent la lentille achromatique et de laisser entre eux une distance à peu près égale à la différence trouvée entre le foyer optique et le foyer chimique. La distance focale se trouve un peu diminuée, mais les images photographiques sont aussi parfaites que les images optiques.

En employant un grossissement considérable, on peut obtenir les images des taches, mais on est loin d'obtenir la netteté à laquelle on arrive par l'observation directe.

Outre les difficultés dont nous venons de parler, il en existe une autre qui est d'autant plus grave qu'il nous est impossible de l'éviter : c'est l'agitation de l'air atmosphérique qui, en produisant des déviations accidentelles des rayons lumineux, enlève aux images la perfection de détails qui est absolument nécessaire dans une méthode de recherches. Aussi, la Photographie étant insuffisante, on est forcé de recourir aux dessins faits à la main.

§ IV. — *Dessins.*

Les dessins des taches sont très-difficiles à faire, lorsqu'elles ont une forme compliquée; et cependant on ne saurait s'en dispenser, car c'est le seul moyen d'obtenir avec exactitude certains détails que la Photographie reproduit difficilement. Ces détails sont tellement changeants, qu'il faut quelquefois les saisir, pour ainsi dire, au vol.

Il serait donc important d'avoir un moyen qui permît aux observateurs de fixer ces souvenirs, sans qu'ils fussent des artistes accomplis. Il y a peu d'astronomes de profession qui soient en même temps d'habiles dessinateurs; nous pouvons citer M. Tacchini de Palerme, dont les dessins sont admirables; mais tout le monde ne réussit pas aussi bien et, le plus souvent, ce travail demande beaucoup de temps. Comme méthode générale, on doit dessiner sur une grande échelle et réduire ensuite par la Photographie : les imperfections du dessin disparaissent dans la réduction et les épreuves présentent une image assez fidèle de ce qu'on a directement observé. Le dessin à la mine de plomb demande beaucoup de temps et d'habileté; aussi, pour opérer rapidement et imiter le mieux possible la structure du Soleil, nous trouvons que la meilleure méthode consiste à peindre sur du papier noir avec du blanc de plomb; le blanc que nous employons, connu dans le commerce sous le nom de *paillard*, est en pains très-petits, portant le titre de *blanc d'argent*. En employant des pinceaux assez fins, nous parvenons à reproduire les plus petits détails. Pour cela, nous commençons par prendre, avec la lunette, une projection très-agrandie de la tache; deux fils d'araignée, dont on a déterminé la distance angulaire, projettent en même temps leur image sur l'écran, ce qui sert de

points de repère pour les mesures à effectuer; ensuite nous terminons cette esquisse à la lunette. C'est par ce procédé que nous avons exécuté la plupart des dessins que nous conservons à l'Observatoire.

Ces figures terminées, comme on les a faites à dessein sur une grande échelle, on les réduit par la Photographie. C'est ainsi que nous avons fait les figures reproduites dans ce Livre, et surtout celles qui représentent les détails des pénombres. Les gravures elles-mêmes ont été faites d'après les réductions photographiques.

Pour que la reproduction des dessins soit aussi parfaite et aussi fidèle que possible, on pourrait employer les procédés de la *Photolithographie;* malheureusement cet art est encore trop peu perfectionné pour qu'on puisse avec économie l'employer sur une grande échelle.



LIVRE II.

EXAMEN DE LA SURFACE DU SOLEIL.

INTRODUCTION.

Les taches qu'on observe sur la surface du Soleil sont en réalité des phénomènes complexes. L'attention des observateurs s'est fixée d'abord sur la région noire qui frappe davantage les yeux, mais ce n'est là qu'une partie du phénomène. Chaque tache est d'abord composée d'un noyau et d'une pénombre; mais, de plus, on doit regarder comme l'un de ses éléments constitutifs les facules qu'on trouve toujours autour d'elle et qui s'étendent parfois à une distance considérable. Ne pouvant tout discuter à la fois, nous commencerons par étudier l'aspect général que présente la photosphère; ensuite nous parlerons de ce qui se passe à l'intérieur des taches; nous terminerons en examinant ce qui se passe à l'extérieur, c'est-à-dire les facules. Nous devons nous borner ici à ce que nous observons directement dans les lunettes, réservant pour un chapitre spécial les détails bien plus décisifs que nous révèle le spectroscope.

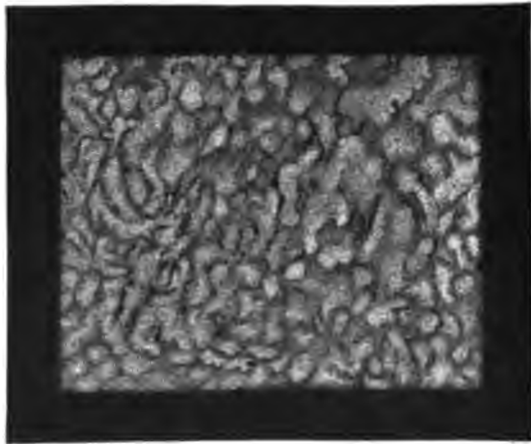
CHAPITRE PREMIER.

ASPECT GÉNÉRAL DE LA PHOTOSPHÈRE.

§ I. — *Inégalités de la surface solaire.*

Lorsqu'on examine le Soleil avec des instruments ayant une grande ouverture et un fort pouvoir grossissant, on voit que sa surface, loin d'être lisse et uniforme, présente une apparence irrégulière et ondulée, comme une mer agitée par la tempête. Lorsqu'on la projette sur un écran blanc, à l'aide d'un puissant oculaire, on lui trouve l'aspect représenté dans

Fig. 19.



la *fig.* 19, caractérisé par une multitude de rides et d'anfractuosités impossibles à détailler.

Quelquefois, surtout auprès du bord et dans le voisinage des taches, on aperçoit çà et là des masses plus lumineuses qui forment de véritables *facules*. Elles occupent souvent un espace assez considérable; mais alors il est rare qu'elles soient très-vives et isolées. La *fig.* 20 représente une facule remarquable observée au Collége Romain. Il est généralement difficile d'observer ce phénomène dans une lunette; on réussit

Fig. 20.



mieux en opérant par projection; mais pour cela il est indispensable que l'observateur soit parfaitement à l'abri de toute lumière diffuse : on doit donc se placer dans une chambre complétement obscure ou sous un dôme dont l'ouverture est protégée par des rideaux noirs très-épais. On aperçoit alors les marbrures générales dans le centre du disque; on peut même déterminer nettement les régions où elles sont plus vives. Cette marbrure présente un aspect très-variable, et la netteté avec laquelle on la voit dépend beaucoup de l'état de notre atmosphère, car elle devient invisible lorsque l'air est

agité; mais ces variations apparentes dépendent aussi des variations réelles de la photosphère, comme l'indiquent les observations faites par les temps les plus calmes.

C'est pour n'avoir pas pris toutes les précautions que nous venons d'indiquer qu'on a échoué pendant longtemps dans l'étude générale de la photosphère, et qu'on a fini par l'abandonner. Scheiner avait cependant signalé les apparences que nous venons de décrire : il caractérisait l'aspect que présente la surface solaire par l'adjectif *crispa* et complétait sa pensée par la comparaison d'une mer agitée par la tempête (¹).

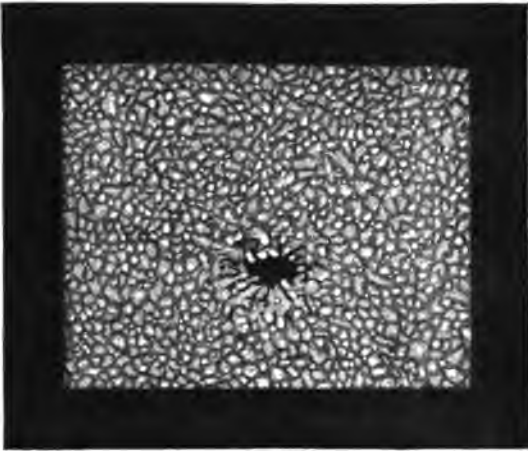
Granulations. — Si l'on veut connaître cette structure d'une manière plus précise, il faut renoncer aux projections, et examiner directement le Soleil avec un oculaire puissant, dans un moment où l'atmosphère est parfaitement calme, et avant que l'objectif commence à s'échauffer. Alors on voit que la surface est recouverte d'une multitude de petits grains, ayant presque tous les mêmes dimensions, mais des formes très-différentes, parmi lesquelles l'ovale semble dominer. Les interstices très-déliés qui séparent ces grains forment un réseau sombre sans être complétement noir. Dans la *fig.* 21, nous avons essayé de faire une esquisse qui représentât l'aspect caractéristique de la surface, car les détails sont impossibles à reproduire. Il nous semble difficile de trouver un objet connu qui rappelle cette structure; on obtient quelque chose d'analogue en regardant au microscope du lait un peu desséché, dont les globules ont perdu la régularité de leur forme. La *fig.* 21 représente ces grains et les interstices qui les séparent, tels qu'on les voit avec un grossissement

---

(¹) *Rosa Ursina*, p. 604, col. 1 : « *Solis superficies leniter crispa.* »

considérable dans des circonstances atmosphériques exceptionnellement avantageuses. Le plus souvent, en faisant usage de faibles grossissements, on aperçoit une multitude de petits points blancs sur un réseau noir, comme on le voit sur le fond qui environne les taches dans les *fig.* 26 et 27. Cette structure est très-apparente dans les premiers moments de l'observation; mais elle ne tarde pas à devenir moins distincte, parce que l'œil se fatigue, en même temps

Fig. 21.

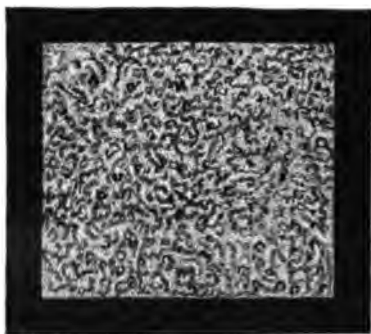


que l'objectif s'échauffe, ainsi que l'air qui est contenu dans le tube.

Quelquefois l'aspect est un peu différent, et aux points blancs et brillants se trouvent mêlés de petits trous noirs. La *fig.* 22 représente la surface du Soleil, dessinée par M. Tacchini le 12 novembre 1871; l'observation se faisait avec la lunette de Cauchoix à l'observatoire du Collége Romain. La comparaison des différents dessins que nous reproduisons peut faire apprécier les différences d'aspect que présente la photosphère, suivant les époques où on l'observe,

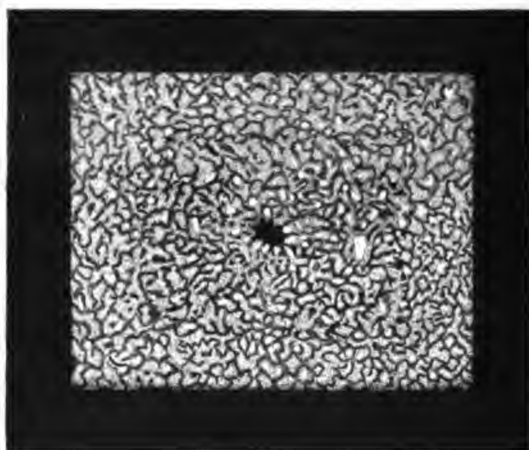
et peut-être suivant les observateurs et les moyens qu'ils emploient. Les grains paraissent comme suspendus dans un

Fig. 22.



réseau noir, et entremêlés de nœuds plus ou moins som-

Fig. 23.



bres, plus ou moins larges. Ces grains se réunissent quelquefois en petits groupes et forment alors une masse plus brillante (*fig.* 23).

Feuilles de saule de M. Nasmyth. — Les grains présentent quelquefois une forme très-allongée, surtout dans le voisinage des taches, ce qui les a fait appeler *grains de riz.* M. Nasmyth les a comparés à des feuilles de saule et en a donné un dessin que nous reproduisons dans la *fig.* 24.

Fig. 24.



Quelques autres observateurs les ont comparés à des points d'exclamation (!), et, dans ces derniers temps, nous avons eu l'occasion de vérifier l'exactitude de cette comparaison. On a beaucoup parlé de ces feuilles de saule, lorsque M. Nasmyth les signala et les décrivit pour la première fois; mais il ne semble pas que ces apparences se présentent aussi souvent et aussi régulièrement qu'on l'affirmait. Peut-être même y a-t-il là quelque chose de purement physiologique, dé-

pendant de l'organe de chaque observateur. Nous verrons que ces feuilles de saule existent réellement, mais qu'elles sont composées de masses bien plus considérables et de formes bien plus variées que ne l'indiquait l'astronome anglais.

Hâtons-nous de dire que cette structure de grains ou de feuilles ne peut être observée qu'avec des instruments à large ouverture, car, les grains ayant de très-faibles dimensions, la diffraction, en les amplifiant et les faisant empiéter les uns sur les autres, produit nécessairement une confusion générale. Les dimensions réelles de ces grains ne sont pas faciles à déterminer, à cause de la difficulté de les fixer individuellement sous le fil du micromètre. On ne peut y réussir qu'en comparant leurs diamètres à ceux des fils micrométriques, et on les évalue à $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{3}$ de seconde. M. Langley, astronome américain, vient de s'occuper de cette étude avec un objectif de 18 pouces; il s'accorde avec nous pour la limite de cette grandeur. Seulement, il lui paraît que quelquefois ces grains sont composés d'autres grains encore plus petits, ce qui est très-vraisemblable, comme nous le verrons bientôt.

On peut mesurer directement le diamètre des grains lorsqu'ils se pressent aux environs des pores ou des taches de très-petites dimensions; mais alors ils sont grossis et ont perdu leur forme ronde, pour s'allonger et devenir semblables à de petites feuilles ayant leur grand axe dirigé vers le centre de l'ouverture. Tel est le cas de la petite tache de la *fig.* 23, observée le 10 août 1865. Cette tache était presque ronde; elle avait un diamètre de 6″,38; son périmètre contenait de 24 à 32 de ces petites feuilles; il était difficile de les compter d'une manière plus précise : leur largeur était donc, en moyenne, de 0″,6 à 0″,8; et si nous tenons compte de l'espace qui les séparait les unes des autres, espace qui est

bien égal au tiers de chacune d'elles, il reste pour leur largeur $\frac{1}{3}$ de seconde, ou $\frac{1}{2}$ seconde.

Ces dimensions sont certainement exagérées, car les grains qu'on observe au milieu du disque sont toujours plus petits que les feuilles qui garnissent le contour des taches, et le diamètre des premiers est toujours amplifié par la diffraction. Chaque point lumineux produit ici un phénomène analogue à celui que présentent les étoiles; l'angle qu'elles soustendent est réellement nul, et par conséquent elles devraient se présenter à nous comme de simples points; et cependant les meilleures lunettes nous les montrent comme de petits cercles dont les dimensions sont très-appréciables. L'instrument que nous employons leur donne un diamètre apparent que nous évaluons à $\frac{1}{3}$ de seconde; mais ce nombre peut être exagéré, et c'est pour cela que M. Langley, qui observe avec une plus grande lunette, les estime plus petits que nous. Notre estimation repose sur ce fait qu'il nous est impossible de distinguer les deux composantes d'une étoile double lorsque leur distance est plus petite que $\frac{1}{3}$ de seconde : on n'obtient alors qu'une seule image ayant une forme ovale. Ces grains, que nous pouvons à peine mesurer à cause de leur petitesse, ont donc un diamètre de 200 à 300 kilomètres au moins. Or des masses d'une telle étendue ne peuvent avoir une lumière uniforme : elles doivent être irrégulières et mamelonnées. Si donc on les observe avec des instruments plus puissants, on devra reconnaître qu'elles sont composées de points distincts qui se confondent lorsqu'on emploie un grossissement insuffisant, mais qu'un grossissement plus considérable parvient à séparer les uns des autres.

Nous avons observé un grand nombre de pores de petites dimensions, et nous les avons toujours trouvés entourés de feuilles semblables à celles que nous venons de décrire; il

faut donc se mettre en garde contre les auteurs qui représentent ces pores comme de simples trous ronds : leur structure est en réalité très-compliquée.

Les grains sont animés de mouvements sensibles, mais très-difficiles à déterminer au milieu de la masse brillante de la photosphère. C'est auprès des pores qu'on peut le constater le plus commodément. Sur le bord de ces ouvertures, on les voit s'allonger, se mouvoir, et en modifier complétement le contour. Ainsi, au bout d'une demi-heure, le trou circulaire représenté dans la *fig.* 23 se trouva à moitié envahi; six grains occupèrent presque la moitié de sa surface, se disposant perpendiculairement à un diamètre passant par le centre. Au bout d'une heure, la cavité avait complétement disparu.

§ II. — *Explication des grains.*

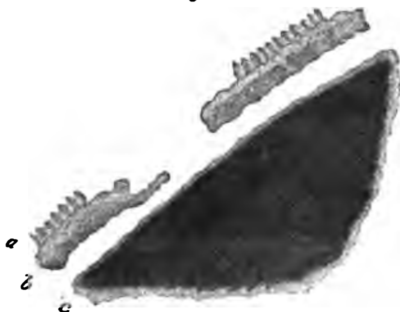
Pour expliquer l'existence des grains, on a eu recours aux théories les plus étranges; on a été jusqu'à les regarder comme des éléments *sui generis*. Nous allons donner une explication qui nous paraît bien simple, et qui s'accorde en partie avec celle de W. Herschel. Ce savant avait observé les granulations, seulement il leur donnait le nom de *corrugations* ou *rides*, expression moins exacte peut-être, mais par laquelle, comme ses descriptions le montrent avec évidence, il désignait le même phénomène dont nous parlons. Il avait aussi remarqué le réseau sombre qui sépare les grains, et il le désignait par le mot *indentation*. Il eut bientôt formé une théorie pour expliquer ces apparences. Pour lui, les points brillants *a* (*fig.* 25) étaient les sommets des cônes de flammes dont le Soleil serait couvert, tandis que le demi-jour *b* du réseau obscur s'expliquerait par les nuages plané-

taires dont il admettait l'existence ; *c* est le noyau solaire obscur. La figure est celle qu'il a donnée dans les *Philosophical Transactions* (1802), pour expliquer son idée.

On peut admettre la première partie de cette explication, car elle s'accorde parfaitement avec les faits, sauf cependant qu'elle paraît supposer une régularité que nous n'avons pas toujours observée ([1]).

D'abord les grains sont de véritables proéminences qui s'élèvent au-dessus de la surface générale, car cette structure est bien plus nette et plus prononcée au centre du disque

Fig. 25.



que sur les bords : c'est que, dans cette dernière région, ils se couvrent en partie les uns les autres, ainsi que l'a fait remarquer Herschel.

L'idée de flammes satisferait à ces apparences ; mais, pour ceux qui regardent la composition de la photosphère comme analogue à celle des nuages, il est bien naturel d'admettre que les grains sont les sommets des mamelons arrondis terminant ces masses vaporeuses qui flottent, comme nos

---

([1]) A en juger par des études stellaires très-soignées, notre réfracteur a une puissance pénétrante au moins égale à celle du miroir de Herschel, et les oculaires que nous employons sont bien plus parfaits que les siens.

cumuli, dans l'atmosphère solaire. Rien n'est plus commun, même sur la Terre, que de voir, du sommet d'une montagne, des brouillards et des nuages produire un effet semblable. Les dimensions énormes de ces corps solaires, présentant une étendue de plusieurs centaines de kilomètres, ne peuvent que rendre cette explication plus plausible.

Nous parlerons dans la suite d'un moyen d'observation plus efficace que ceux dont nous avons parlé jusqu'à présent : le spectroscope nous montrera que le Soleil est habituellement recouvert d'une multitude de petits jets enflammés, et ces observations nous feront admettre que, plus probablement, les grains doivent être regardés comme étant les sommets de ces proéminences qui recouvrent la surface solaire.

Nous avons dit que les grains s'allongent dans le voisinage des pores. Ce phénomène est-il réel ou bien n'est-ce qu'une apparence ? On peut soutenir chacune de ces deux hypothèses ; peut-être que ces grains, pressés par ceux qui les environnent, tendent à s'allonger réellement pour remplir l'espace laissé vide, comme nous l'observons quelquefois pour les nuages qui flottent dans notre atmosphère ; peut-être aussi les cônes lumineux s'inclinent-ils simplement vers l'ouverture voisine, sans s'allonger réellement. Nous reviendrons bientôt sur cette question pour la traiter avec de nouveaux détails.

La surface du Soleil est quelquefois tellement recouverte de ces granulations, le réseau est tellement prononcé, qu'on serait tenté de voir partout des pores et des rudiments de taches. Mais cet aspect n'est pas constant, et il en faut chercher la cause non-seulement dans les variations de notre atmosphère qui rendent quelquefois les observations difficiles, mais aussi dans les modifications qu'éprouve le Soleil. Du reste, il faut le reconnaître, ces petites granulations sont

les particularités les plus difficiles à observer, à cause de l'échauffement assez rapide de l'objectif et du tube. M. Nasmyth assure qu'en supprimant le tube de sa lunette il distinguait beaucoup de détails qui lui échappaient sans cette précaution.

De cette discussion il faut conclure que la photosphère ne se compose pas d'un fond brillant recouvert de points noirs : elle résulte au contraire d'une multitude de points lumineux disséminés sur une espèce de réseau plus sombre ; les nœuds de ce réseau s'élargissent quelquefois au point de former des pores ; les pores, en s'élargissant davantage, finissent par donner naissance à une tache. Tel est l'ordre dans lequel se succèdent ordinairement ces phénomènes.



CHAPITRE II.

DES TACHES.

§ I. — *Circonstances qui accompagnent leur formation.*

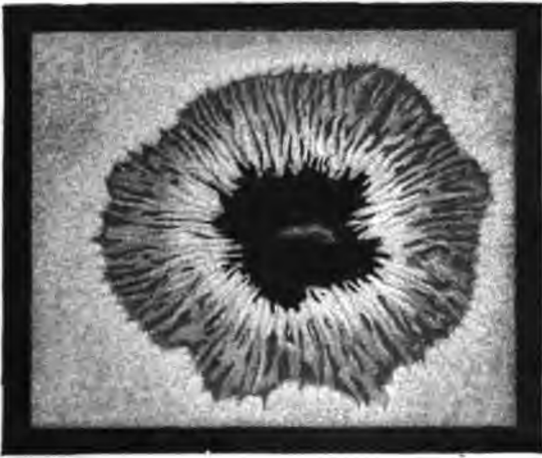
Le temps nécessaire à la formation d'une tache est extrêmement variable, et il est impossible d'y découvrir aucune loi : quelques-unes se forment très-lentement par la dilatation des pores, d'autres apparaissent presque subitement. Cependant, si l'on observe le Soleil tous les jours avec beaucoup de soin, on reconnaît que cette formation n'est jamais complétement instantanée, quelque rapide qu'elle puisse être. Le phénomène est toujours annoncé quelques jours d'avance; on aperçoit dans la photosphère une grande agitation qui se manifeste souvent par des facules très-brillantes donnant naissance à un ou plusieurs pores. Bien souvent encore on voit apparaître des groupes de petits points noirs, comme si la couche lumineuse devenait plus mince, de manière à disparaître peu à peu pour laisser à découvert un noyau obscur (¹). Ces pores se déplacent d'abord avec rapidité, disparaissent pour se reproduire, puis l'un d'entre eux semble prendre le dessus et se transforme en une large ouverture. Aux premiers

(¹) Nous sommes obligés d'employer ici le langage le plus habituellement reçu. Nous verrons plus tard comment il faut expliquer ces apparences, et quelle est la véritable nature des phénomènes physiques dont elles sont de simples manifestations.

instants de la formation, il n'y a point de pénombre nettement définie; elle se développe progressivement et devient régulière à mesure que la tache elle-même prend une forme arrondie, comme on le voit dans la *fig.* 26.

Cette formation tranquille et paisible ne se réalise qu'à des époques où le calme semble régner dans l'atmosphère solaire; en général, le développement est plus tumultueux et plus complexe. Donnons-en quelques exemples seulement,

Fig. 26.



car nous pourrions les multiplier à l'infini, et les observateurs qui voudront s'adonner à ce genre de recherches ne tarderont pas à en trouver eux-mêmes un très-grand nombre, tous très-capricieux et très-différents les uns des autres.

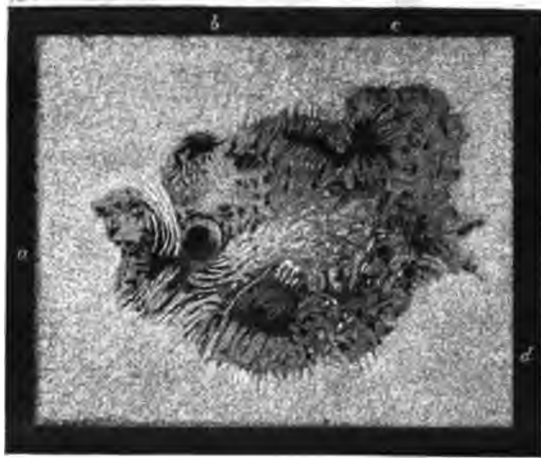
§ II. — *Exemples de formations rapides.*

Nous choisirons, pour premier exemple, la tache qui parut le 30 juillet 1865 (*fig.* 27).

Le 28 juillet, on n'apercevait en cet endroit rien d'extraor-

dinaire, ni pores, ni facules. Le 29, il y avait simplement trois points noirs. Le 30, à 10h30m, nous fûmes bien surpris de trouver une tache énorme correspondant à peu près au centre du disque. Le diamètre moyen de la partie troublée était de 76 secondes, c'est-à-dire quatre fois et demie environ le diamètre de la Terre. Au centre, nous apercevions une masse de matière lumineuse qui semblait tourbillonner, et autour de laquelle s'étaient produites de nombreuses déchi-

Fig. 27.



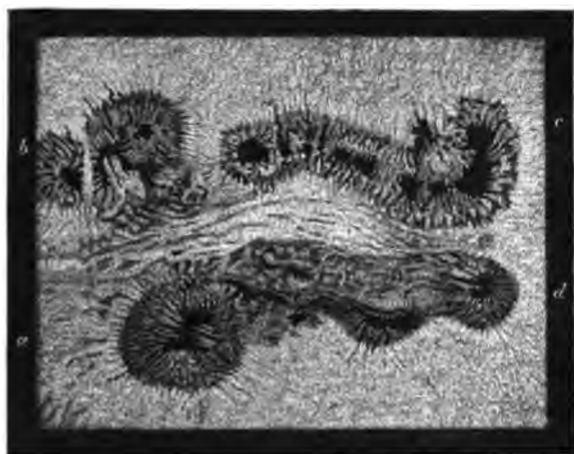
rures. Au milieu de ce chaos, on pouvait distinguer quatre centres principaux de mouvement. A gauche, en *a*, se présentait une vaste ouverture; autour d'elle des langues de feu tournoyaient en différents sens, et au milieu de ces langues on distinguait nettement des voiles à moitié lumineux qui environnaient une cavité plus noire.

Au-dessus, en *b*, se trouvait un second centre, plus petit que le premier, dont le bord supérieur était nettement tranché, mais ayant à sa partie inférieure un grand nombre de petites langues de feu analogues aux précédentes. A droite, en

c, une large fente présentait grossièrement la forme d'une S; elle était parsemée de langues de feu et de traits lumineux détachés. Enfin, à la partie inférieure, au niveau du point *d*, on voyait une autre fente allongée et recourbée, offrant à l'œil un désordre qui défie toute description. Entre ces quatre cavités, il y avait un amas de facules et de matière lumineuse présentant l'aspect d'une masse en ébullition.

Tout cet ensemble était animé de mouvements tumultueux

Fig. 28.



et extrêmement rapides. On fit le dessin le plus promptement possible, mais il n'était pas encore terminé que la première partie avait déjà complétement changé de forme. Le soir, on fit un second dessin, mais il ne ressemblait au précédent que par le caractère fondamental; au centre, une matière photosphérique très-agitée; autour, une couronne de gouffres béants, dont les quatre principaux subsistaient encore, occupant sensiblement la même place.

Le lendemain, l'aspect était complétement changé. La *fig.* 28 donne une idée de la nouvelle disposition. On reconnaît

encore les quatre centres principaux, mais ils sont comme alignés deux à deux, et rejoints par des crevasses sinueuses. La cavité *b* est déjà bien marquée, et séparée de la grande fente par un isthme composé de matière photosphérique à l'état normal. Les deux points inférieurs, *a* et *d*, sont encore réunis, mais mieux dessinés; la masse intermédiaire est comme étirée, et son aspect rappelle celui d'une boule de coton cardé qu'on allongerait en tirant les deux côtés. Cette comparaison est la seule qui puisse exprimer les apparences que nous avons essayé de reproduire dans le dessin. En vingt-quatre heures, les dimensions s'étaient considérablement modifiées; la longueur avait presque doublé : elle était de 147 secondes. Les jours suivants, la masse qui séparait les quatre ouvertures se transforma à peu près en une pénombre sur laquelle étaient dispersés des grains lumineux.

Nous regrettons de ne pouvoir donner ici la série complète des dessins que nous avons exécutés chaque jour avec beaucoup de soins, mais nous reviendrons plus tard sur quelques détails intéressants et très-instructifs. Deux mots seulement pour terminer l'histoire de cette tache. — Les centres s'isolèrent et se prononcèrent de plus en plus; l'intervalle qui les séparait resta couvert de petites taches isolées. Le 27 août, c'est-à-dire après une rotation complète du Soleil, la grande ouverture en forme d'S subsistait encore au point *c*; les centres *a* et *b* étaient encore nettement dessinés à la partie antérieure. Ce jour-là, il semble qu'il y ait eu une recrudescence dans la perturbation; entre les centres *a* et *b*, et les deux autres *c* et *d*, il y avait une distance de plusieurs minutes. Le 17 septembre, après une nouvelle rotation, on voyait simplement des pores et des facules. Enfin, après une troisième rotation, il ne restait plus de trace de cette immense perturbation qui avait agité l'atmosphère du Soleil.

§ III. — *Dissolution de la matière lumineuse dans les taches.*

Nous venons de voir que la matière lumineuse qui sépare les taches voisines l'une de l'autre se trouve complétement déchirée et modifiée. L'observation prouve même qu'elle subit une dissolution complète lorsque plusieurs centres obscurs se sont formés autour d'une masse brillante isolée. Citons-en un exemple frappant. Le 29 mai 1865, nous observions une

Fig. 29.



tache dont les dimensions n'avaient rien d'extraordinaire : elle mesurait environ 50 secondes (*fig.* 29).

Elle présentait, rangés autour d'une masse centrale, un grand nombre d'orifices séparés les uns des autres par des filets lumineux, dont la disposition ressemblait à celle des rayons d'une roue qui, partant de l'axe, se dirigent vers la circonférence. Ces noyaux étaient parsemés de voiles et de petits grains détachés dont quelques-uns étaient disposés en spirale. Le soir quelques rayons avaient disparu, et la spirale était dirigée en sens contraire. Le 30 (*fig.* 30), il ne restait que trois rayons. Le 31 (*fig.* 31), il n'y avait plus au centre de matière photosphérique ; il en restait seulement quelques bandes recourbées en forme d'anses, ne se rejoignant pas au

centre. Les jours suivants la masse se divisa, et le 3 juin il s'était définitivement formé deux taches isolées, ayant des formes arrondies, mais peu régulières.

Ces phénomènes sont très-intéressants, mais ils ne sont

Fig. 30.



pas rares. Nous avons souvent constaté que des masses très-

Fig. 31.



brillantes qui se trouvent enfermées dans des groupes de taches disparaissent complétement en vingt-quatre heures. Il résulte de ces dissolutions de masses lumineuses que les taches tendent à s'arrondir, et la forme ronde est, pour ainsi dire, la forme normale à laquelle parviennent toutes les taches lorsqu'elles sont complétement développées.

§ IV. — *Division et multiplication des taches.*

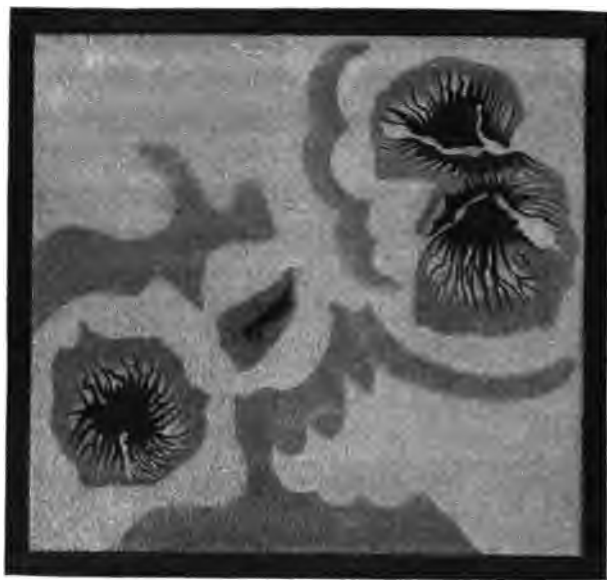
On voit souvent plusieurs taches se fondre en une seule par la dissolution de la matière lumineuse qui les sépare. Le contraire arrive quelquefois : une tache complétement formée et devenue ronde se divise en plusieurs autres. Ce résultat peut se produire de plusieurs manières. Quelquefois c'est par un espèce de bourgeonnement : un petit noyau se forme à côté du grand dans la pénombre elle-même; il se développe, se sépare et finit par constituer une tache indépendante. Le plus souvent, cependant, le phénomène de multiplication résulte d'un fractionnement du noyau primitif; on voit paraître des arcs brillants, connus sous le nom de *ponts,* qui traversent les taches et les séparent en plusieurs parties. La *fig.* 32 montre un groupe de ces grandes taches qui, après avoir acquis la forme circulaire, commencent à être envahies par des ponts. Cet envahissement se fait quelquefois d'une manière si subite qu'il semble que le noyau se brise. Halley en fut un jour témoin, et la transformation fut si instantanée qu'il crut assister à la fracture d'une large scorie brisée comme un morceau de glace atteint par un coup de pierre. Les ponts brillent ordinairement d'un éclat aussi vif que celui des parties les plus lumineuses de la photosphère. Quelquefois même on dirait qu'ils sont encore plus brillants et qu'ils sont réellement suspendus au-dessus des abîmes qu'ils traversent. Ces phénomènes sont trop complexes pour que nous puissions en ce moment nous prononcer sur leur nature; qu'il nous suffise de les avoir indiqués et réservons-nous de les étudier plus tard en détail.

Les phénomènes décrits jusqu'à présent nous montrent que les taches ne sont pas des apparences purement superfi-

cielles ; elles ont leur siége dans les profondeurs de la masse solaire, et elles sont produites par des causes encore inconnues, qui la remuent et la bouleversent dans une étendue quelquefois très-considérable.

Il est rare que les taches soient isolées : elles sont ordinai-

Fig. 32.



rement réunies en groupes très-complexes, comme on le voit dans l'observation du 14 avril 1869 (*fig.* 33). On remarque dans ce groupe une grande tache divisée en deux par un pont très-compliqué. On voit trois autres taches qui tendent à devenir rondes; puis il y en a une multitude de petites disséminées de toutes parts. Il en résulte une immense difficulté dans la distinction et dans la classification de ces phénomènes. L'étendue de ces groupes est considérable ; l'agitation manifestée dans la masse par les facules qui les environnent est si grande que l'ensemble peut acquérir une

longueur égale au quart du diamètre solaire. Sans doute toutes les perturbations ne se font pas sentir sur une aussi vaste étendue, mais le fait important, c'est l'existence habituelle de ces groupes plus ou moins compliqués, plus ou moins grands.

Les taches ne sont donc que les conséquences d'une forte

Fig. 33.



agitation dans la matière qui compose le Soleil, et cette agitation s'étend bien au delà des limites de la région sombre. Tous ces mouvements supposent qu'il se produit dans la masse solaire des crises bien considérables, et, si nous voulons en trouver la cause, il faut commencer par étudier le phénomène lui-même, et les lois qui président à ses manifestations.



CHAPITRE III.

ÉTUDE DE L'INTÉRIEUR DES TACHES.

§ I. — *Les taches sont des cavités.*

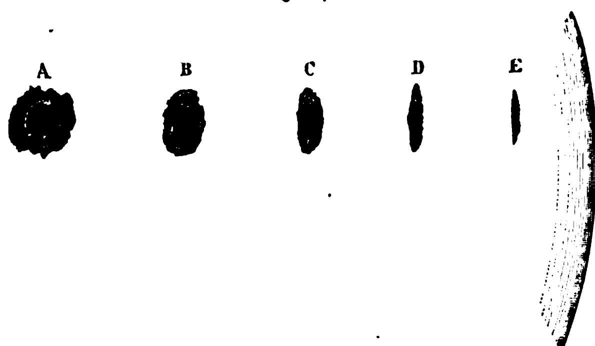
Il y a environ un siècle que Wilson, par des observations bien dirigées et bien interprétées, fit connaître la véritable structure de certaines taches, en montrant qu'elles sont dues à des cavités dont il put même mesurer la profondeur. Il rendit compte de ces observations dans les *Transactions philosophiques* de Londres, t. LXIV, année 1774.

Le 22 novembre 1769, le docteur Wilson observa sur le disque solaire une belle tache ronde environnée d'une pénombre également circulaire, concentrique au noyau. Il suivit cette tache jusqu'à sa disparition, et il remarqua bientôt que la pénombre cessait d'être symétrique; la partie tournée vers le centre du Soleil devint de moins en moins large, et finit par disparaître complétement, tandis que la partie opposée conservait à peu près les mêmes dimensions. Ainsi, dans la *fig.* 34, supposons que A représente une tache placée au centre du disque, et ayant une pénombre symétrique par rapport au contour du noyau; lorsqu'elle sera arrivée vers le milieu du rayon, elle se présentera comme en B; plus tard, la pénombre disparaîtra complétement du côté gauche, comme on le voit en C; au point D, le noyau lui-même sera entamé; enfin, tout près du bord, en E, il ne restera plus qu'un mince

filet de pénombre : le noyau aura complétement disparu. Tel est le phénomène observé par Wilson, et souvent étudié depuis.

A la rigueur, ces changements pouvaient n'être que des apparences ; les taches sont si capricieuses dans leurs variations qu'on ne peut fonder aucune théorie sur un fait isolé. Cependant Wilson avait soupçonné là quelque grande loi de la nature, et, pour n'être pas induit en erreur, il attendit le retour de la même tache qui, en effet, reparut au bout de quatorze

Fig. 34.

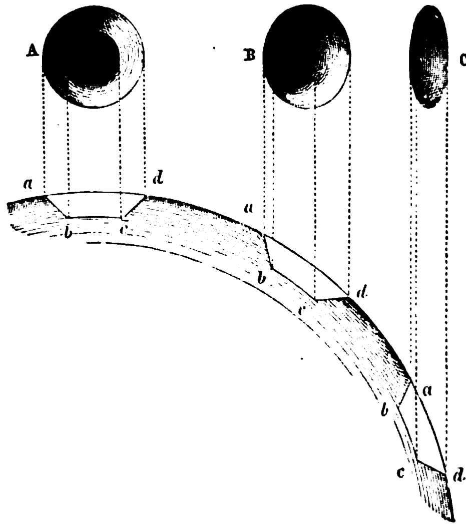


jours sur le bord oriental. Alors il observa de nouveau le même phénomène ; les mêmes phases se reproduisirent dans le même ordre, et la pénombre, qui était rétrécie vers le centre du disque lorsque la tache était près du bord, se montra de nouveau symétrique par rapport au contour du noyau, lorsqu'elle arriva au milieu.

Désormais le doute n'était plus possible ; la tache avait sensiblement conservé la même forme dans son mouvement, et les changements observés étaient de pures apparences résultant d'un effet de perspective très-facile à expliquer. Soit *abcd* (*fig.* 35) une cavité ayant la forme d'un tronc de cône, *ad* et *bc* étant les diamètres des deux bases. Vue dans une direction

perpendiculaire à *ad*, cette cavité présentera un contour symétrique A; mais si on la regarde obliquement, comme en B, le côté *ab* se rétrécira dans la projection, le côté *cd* s'élargissant un peu, ou restant sensiblement constant si la cavité est peu profonde. Enfin, l'obliquité augmentant, le bord *ab* se projettera sur le fond *bc* comme on le voit en C; il pourra même le recouvrir complétement.

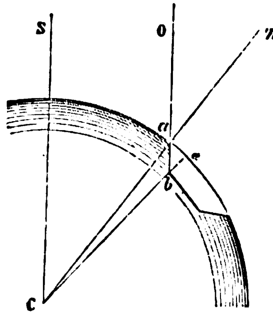
Fig. 35.



Ces différentes phases seront d'autant plus sensibles que la cavité sera plus profonde; mais, si elle est très-superficielle, le fond ne disparaîtra que pour une très-grande obliquité, ce qui, dans le Soleil, n'aura lieu qu'auprès du bord; alors l'observation sera très-difficile et exigera de très-bons instruments. On comprend cependant qu'elle soit possible, et, si elle est bien faite, elle pourra servir à déterminer la profondeur de ces cavités d'après les dimensions relatives de la pénombre et le moment où elle touche le noyau.

Soient CS (*fig.* 36) le rayon visuel dirigé vers le centre du Soleil; O*ab* le rayon qui rase à la fois le bord de la cavité et celui du noyau, au moment où la pénombre va disparaître; CZ une droite passant par le centre du Soleil et par le bord extérieur de la pénombre. On peut toujours connaître l'angle SCZ, et de là déduire la valeur de l'angle *bae* qui en est le complément. Si l'on a mesuré la largeur de la pénombre *ae*, le petit triangle *abe* fera connaître la profondeur *be* de la tache. Wilson trouva ainsi que cette profondeur était environ le tiers du rayon terrestre.

Fig. 36.



La théorie de Wilson ne fut pas reçue sans contestations; elle fut combattue par plusieurs astronomes et en particulier par de la Lande qui formula les deux objections suivantes : 1° dans plusieurs observations, la loi de Wilson ne s'est pas vérifiée; 2° quelquefois même on a pu constater des apparences tout à fait opposées. De la Lande était partisan de la fixité des taches qu'il regardait comme des montagnes; il devait donc nécessairement repousser les idées de l'astronome anglais. Du reste, il est parfaitement exact que les apparences décrites par Wilson ne se présentent pas toujours, surtout aux époques de grande agitation; on ne doit pas en être surpris, et nous en donnerons bientôt la raison. Mais, pour apprécier

la valeur de ces objections et pour connaître ce qui concerne les faits eux-mêmes, nous allons d'abord étudier les observations faites par les astronomes modernes.

§ II. — *Observations modernes.*

Tous les astronomes postérieurs à Wilson ont vérifié ses observations avec d'excellents instruments et sur un très-grand nombre de taches. Herschel en parle souvent, et nous avons eu, ainsi que beaucoup d'astronomes encore vivants, l'occasion de confirmer cette découverte par nos propres travaux. Les résultats numériques que nous avons trouvés ([1]), ainsi que ceux de M. Tacchini, diffèrent à peine de ceux de Wilson. M. Warren de la Rue, astronome anglais, discutant les observations astronomiques faites à Kew, a trouvé que, sur 89 taches régulières, 72 donnent des résultats conformes aux idées de Wilson, tandis que les 17 autres présentent un aspect différent. Cette proportion n'a rien de surprenant lorsqu'on songe aux variations considérables que les taches subissent en réalité dans leurs formes.

M. de la Rue a imaginé un moyen bien simple de montrer que les taches sont des cavités. On prend deux photographies du Soleil faites à un jour d'intervalle, chaque point de sa surface s'étant déplacé pendant ce temps d'environ 15 degrés; on les place dans un stéréoscope et l'on voit parfaitement la cavité intérieure dont les bords paraissent relevés au-dessus de la photosphère. Il est donc impossible de conserver le moindre doute sur cette vérité; les taches sont des cavités creusées

---

([1]) Voir *Astron. Nach.* et *Mémoires de l'Observatoire du Collége Romain*, p. 9; 1859.

dans l'épaisseur de la couche brillante qui enveloppe de toutes parts le globe solaire.

S'il est vrai qu'une tache soit ainsi formée par une cavité, lorsqu'elle arrive au bord du disque solaire, on devrait apercevoir une échancrure d'autant plus facile à observer que la cavité est plus vaste et plus profonde. Cette observation a été réellement faite depuis longtemps. Cassini ([1]) rapporte que, vers la fin de décembre 1719, il parut une tache si vaste que, quand elle approcha du bord, elle produisit une *échancrure*, contrairement à ce qui arrive d'ordinaire pour les taches plus petites, qui présentent souvent un *bourrelet* à cause des facules qui les environnent. W. Herschel et M. Warren de la Rue ont souvent observé le même phénomène.

Lorsque la tache du 30 juillet, dont nous avons déjà parlé, fut arrivée près du bord, nous la surveillâmes avec soin; mais la première partie disparut le 5 août au soir, et l'air était alors si agité qu'il nous fut impossible de rien observer. Le lendemain, l'air était calme et le ciel parfaitement pur; la tache fut dessinée simultanément par trois observateurs. M. Tacchini, de Palerme, était alors à notre Observatoire et il fit lui-même le dessin que nous reproduisons (*fig.* 37 A). Il était 9 heures; l'un des cratères était près du bord et l'on voyait nettement son contour former une proéminence au-dessus du disque solaire en laissant une échancrure de part et d'autre. Sur le côté, on voyait une vaste facule *mn*. Cette partie du contour était déprimée au-dessous de la surface générale du Soleil, dans une région où, peu de temps auparavant, on distinguait une vaste pénombre.

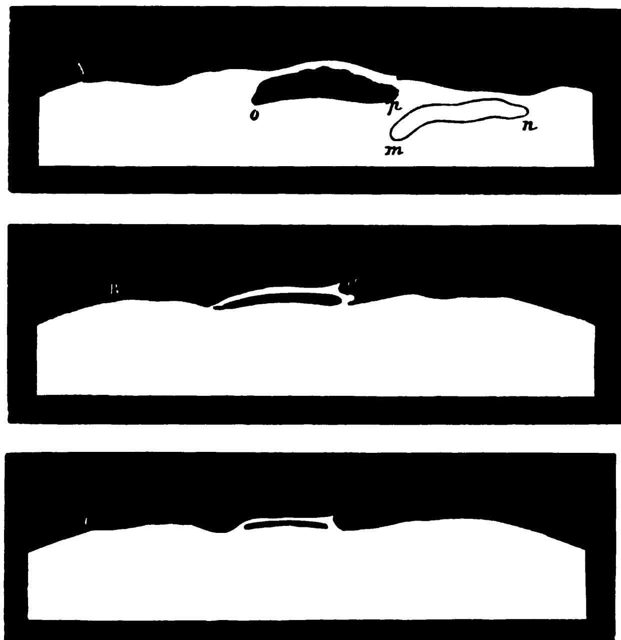
A $10^h 20^m$ le cratère était considérablement rétréci

([1]) *Mémoires de l'Académie des Sciences;* 1720.

(*fig.* 37 B), et présentait plusieurs pointes très-aiguës; on en distinguait une en *a*, qui fut remarquée par tous les observateurs, à cause de ses dimensions et de sa forme recourbée.

A 10^h 32^m l'intérieur du cratère ne présentait plus qu'une ligne noire très-mince qui disparut à 11 heures; le contour

Fig. 37.



du Soleil conservait encore sa structure dentelée (*fig.* 37 C).

Nous avons fait une observation semblable le 8 juillet 1873; il s'agissait également d'une tache très-vaste qui produisit sur le contour du Soleil une dépression de 8 secondes.

Nous ne voulons pas quitter ce sujet sans faire remarquer la forme curieuse de l'arc brillant *op* (*fig.* 37 A), sur lequel on remarqua ensuite la pointe *a* (*fig.* 37 B et C). Ne croirait-on pas voir un pont suspendu au-dessus d'un abîme?

Nous avons dernièrement observé quelque chose de semblable. Le 9 juillet 1874, il y avait une tache traversée par un pont magnifique; le 10, la tache s'étant rapprochée du bord du disque, le pont parut excentrique par rapport au noyau ; il se projetait sur le côté de la tache opposé au centre du Soleil. Le 11, son excentricité s'était accrue; il se projetait sur la pénombre. Ces changements peuvent sans doute être réels, mais, comme il y avait d'ailleurs une grande constance dans la forme de ce groupe, nous sommes très-disposé à croire qu'il n'y avait là que des apparences dues à un effet de perspective : ce pont était un arc lumineux plus élevé que les régions voisines, et qui, suivant les différents aspects sous lesquels il se présentait à nos regards, se projetait sur des parties différentes de la cavité située au-dessous de lui.

§ III. — *Réponses à quelques objections.*

Il est impossible d'observer cette dépression dans toutes les taches; car, à moins qu'elles n'aient des dimensions exceptionnelles, la cavité intérieure est cachée par le bord, ainsi qu'on l'observe pour les cratères de la Lune. De plus, les facules qui les environnent forment souvent un bourrelet proéminent qui masque encore davantage la cavité. Pour produire une échancrure de 1 seconde, il faudrait une tache ayant 3 degrés de diamètre, et une semblable dépression serait impossible à observer à cause de sa petitesse et des oscillations de l'atmosphère. En partant de ces données, on peut calculer l'étendue que devrait avoir une tache pour produire une dépression sensible et facile à observer. Pour arriver à une échancrure de 5 secondes, il faudrait une tache qui, vue du centre du Soleil, occupât une étendue de 11 à 12 degrés,

ce qui fait pour nous 3′ 20″; or, toutes les fois qu'un cratère a atteint ces dimensions, on a toujours remarqué qu'en arrivant près du bord il produisait une dépression manifeste. Ces observations confirment donc avec évidence la découverte de Wilson, et nous obligent à la considérer comme un fait acquis à la science. Sans doute il y a des exceptions, comme l'ont fait remarquer de la Lande et plusieurs autres; mais elles ne s'appliquent qu'à des taches irrégulières et agitées, dans lesquelles les mouvements réels peuvent masquer ces effets de perspective.

On a encore objecté que cette dépression apparente pourrait bien être une illusion due à ce que, dans la région occupée par une tache, la lumière possède un éclat moins considérable; mais il n'y a rien, dans cette objection, qui soit contraire à la théorie que nous défendons. Nous ne prétendons pas que la cavité soit *vide* de toute matière; lorsque nous parlons de *cavité*, nous voulons seulement dire que, dans l'intérieur des taches, le niveau de la partie brillante est plus bas que dans la photosphère, et l'absence de lumière qu'on observe au bord échancré du disque ne prouve pas autre chose; ces dépressions peuvent d'ailleurs être remplies de matières plus obscures, qui servent à maintenir l'équilibre général en arrêtant les masses fluides, qui ne manqueraient pas de se précipiter pour remplir le noyau s'il était absolument vide. La théorie de Wilson est vérifiée du moment que l'intensité lumineuse paraît considérablement déprimée lorsqu'une grande tache arrive auprès du bord, car il faut en conclure que le niveau de la partie brillante y est abaissé; et c'est précisément là ce qui résulte du fait constaté par Wilson.

Tout ce que nous venons de dire restera encore vrai si l'on admet que les taches sont des nuages plus sombres que la

matière qui les environne; mais alors il faudra admettre que, au lieu d'être suspendus au-dessus de la partie éclairante du Soleil, comme le disait Galilée et dernièrement encore M. Kirchhoff, ces nuages flottent dans la photosphère elle-même, s'y enfoncent, du moins en partie, et remplissent ainsi de véritables bassins concaves creusés dans la couche brillante. C'est là ce qui a fait donner aux taches le nom de *cratère;* mais il ne faut pas attacher beaucoup d'importance à cette dénomination.

Après avoir établi que les taches sont en général des cavités, en entendant ce mot dans le sens que nous venons d'expliquer, Wilson supposa que la pénombre qui environne le noyau est formée par le talus qui relie cette cavité à la surface générale de la photosphère. Il supposait la matière photosphérique analogue à celle qui compose les nuages, mais d'une densité plus considérable, et elle devait, d'après lui, couler vers ces gouffres demeurés vides, de manière à former tout autour un plan incliné moins lumineux que le reste de la surface, et moins sombre que le noyau lui-même. Pour confirmer son interprétation, il rappelait le fait suivant : le contour de la pénombre est généralement parallèle à celui du noyau; quelquefois cependant il présente à l'intérieur des angles rentrants qui correspondent à des angles saillants du contour extérieur, comme si un éboulement du talus avait fait tomber dans le gouffre une partie de la matière lumineuse. Cette disposition des noyaux est reproduite dans plusieurs de nos dessins, et en particulier dans les *fig.* 38 et 39.

Cette observation délicate de Wilson est exacte, et l'on a souvent l'occasion de la vérifier; mais on ne peut admettre que la seule inclinaison du talus suffise pour expliquer la pénombre. L'intensité lumineuse de la pénombre est à peu près la moitié de celle qu'on observe sur le reste du disque;

le simple fait de l'inclinaison de la surface suffirait à peine pour expliquer cette différence s'il s'agissait d'un corps éclairé par une lumière étrangère; à plus forte raison cette explication est-elle insuffisante pour un corps lumineux par lui-même. Nous verrons bientôt que, en ce point, il manquait quelque chose à la théorie de Wilson, et nous la compléterons alors. Il lui fut impossible d'étudier en détail la structure de la pénombre, ses instruments n'étant pas assez puissants, et c'est de là que dépendait la solution du problème.



CHAPITRE IV.

STRUCTURE DES TACHES.

§ I. — *De la pénombre.*

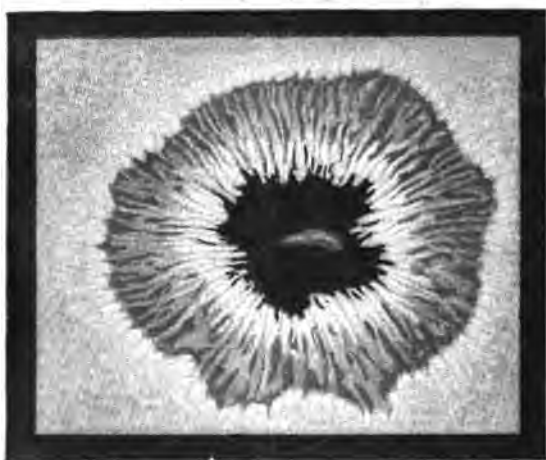
Nous avons vu que les taches ont des formes très-variables. Elles finissent généralement par devenir rondes; mais c'est là, pour ainsi dire, une forme limite qu'elles n'atteignent qu'assez tard et qu'elle ne conservent pas longtemps. Bientôt elles se rétrécissent, reprennent l'apparence de pores et finissent par se fermer complétement. Quelquefois elles se divisent avant de disparaître, et alors on remarque le plus souvent une recrudescence d'action, qui élargit l'ouverture ou en forme quelque autre dans le voisinage. Entrons dans l'examen détaillé de ces phénomènes, et, pour en comprendre le mécanisme, étudions d'abord la structure intérieure.

Commençons par la période de tranquillité; les taches présentent alors la forme ronde ou ovale que nous avons déjà indiquée, et dont nous donnons un exemple dans la *fig.* 38 : cette tache, observée le 20 avril 1866, représente un type qui se reproduit très-souvent.

Nous ferons ici plusieurs remarques : 1° la pénombre a une largeur à peu près égale au tiers de la tache considérée dans toute son étendue; mais elle est loin d'être uniforme dans sa structure et d'avoir son contour extérieur parallèle à celui du noyau, comme le montrent les dessins qui se trouvent dans la

plupart des livres. Cette pénombre est toute rayonnée, mais les rayons qui la composent ont des formes irrégulières; quelques-uns ressemblent à des courants sinueux qui vont en se rétrécissant à mesure qu'ils s'éloignent du bord, leur éclat lumineux croissant lui-même à mesure qu'ils se rétrécissent davantage. Ces courants sont formés de masses ovales, semblables à des nœuds allongés placés bout à bout, de manière

Fig. 38.

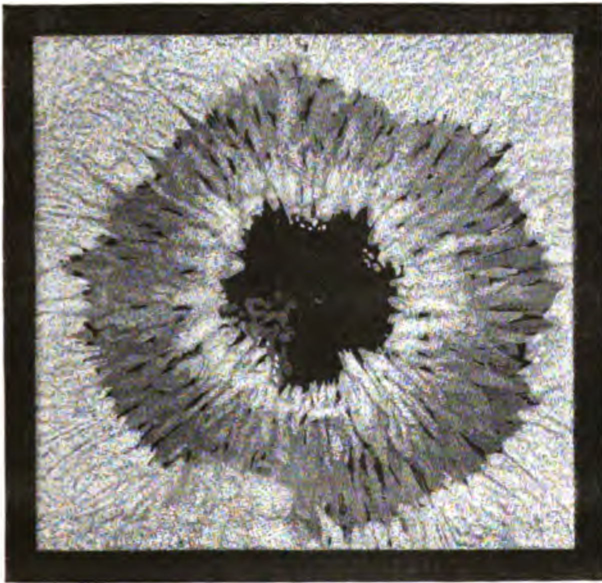


à simuler un courant presque continu. Cette structure rayonnante de la pénombre n'est pas difficile à constater; elle la déjà été remarquée par Capocci, Pastorff, J. Herschel, etc.

2° Ces courants sont moins condensés, moins lumineux, moins nettement tranchés à l'extérieur de la pénombre, là où ils se détachent de la photosphère, tandis que, près du noyau, ils se pressent, se condensent et deviennent plus brillants. Il arrive ainsi quelquefois que le bord de la pénombre, contigu au noyau, acquiert un éclat plus vif, presque égal à celui de la photosphère; la tache paraît alors composée de deux an-

neaux brillants concentriques. Ce n'est pas là une illusion due à un effet de contraste, c'est un accroissement réel de lumière dû à une condensation de matière lumineuse dans le voisinage du noyau. Ce fait est très-important et on ne l'a pas assez remarqué, quoique les observateurs l'aient représenté avec soin dans leurs dessins. Nous en donnons un se-

Fig. 39.

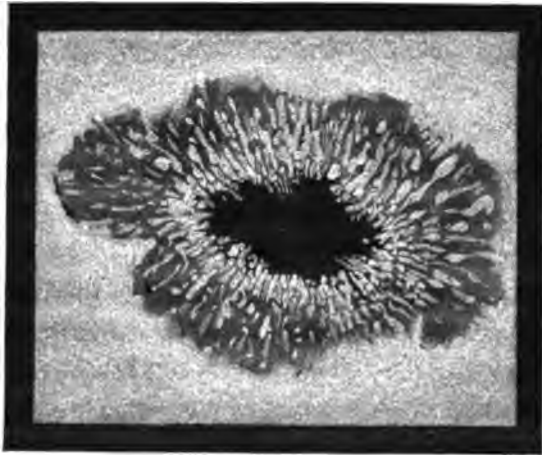


cond exemple dans la *fig.* 39, qui représente une tache observée le 16 juillet 1866.

Dans ces derniers temps, M. Faye a révoqué en doute le fait que nous venons de signaler; mais nos observations personnelles nous obligent d'assurer que ce fait est bien souvent incontestable, et l'illustre astronome n'en douterait pas plus que nous s'il avait pu l'observer comme nous avec des instruments suffisamment parfaits.

3° Dans la *fig.* 39, on voit que les extrémités intérieures des courants se terminent par des grains brillants projetés sur le fond noir du noyau. On voit ce phénomène reproduit d'une

Fig. 40.



manière plus frappante dans la *fig* 40 ; toute la pénombre

Fig. 41.



semble formée d'un voile lumineux, d'un éclat uniforme, sur lequel sont projetés ces grains brillants.

Dans les taches de grandes dimensions et de formes irrégu-

lières, on voit ces grains allongés enfilés l'un après l'autre comme ceux d'un chapelet; le tout ressemble à un fil sur lequel on aurait fait une chaîne de nœuds (*fig.* 41). Parfois ces chaînes traversent la tache de part en part comme des ponts (*fig.* 42, 14 avril 1869); elles constituent alors des courants continus, mais remplis d'inégalités et de renflements. Dans la tache du 14 avril, la veille du jour où se forma le pont

Fig. 42.



qu'on voit dans la *fig.* 42, les feuilles étaient comme implantées les unes sur les autres, et l'ensemble présentait l'aspect de la plante connue sous le nom de *Cactus* (*fig.* 43). Au premier abord, on aurait dit une cristallisation analogue à celle du chlorhydrate d'ammoniaque vue au microscope, et c'est là peut-être ce qui a suggéré à M. Chacornac l'idée des cristallisations solaires. Mais l'aspect arrondi des grains, leurs contours vagues et mal définis, montraient parfaitement que nous avions sous les yeux des flocons de matière suspendus dans un milieu fluide, à peu près comme les cumuli dans l'at-

mosphère terrestre. M. Langley a dernièrement vérifié notre observation avec son puissant instrument.

Les feuilles ressemblent quelquefois à des triangles allongés; on dirait un assemblage de points d'exclamation (!) Nous avons tout récemment constaté cette structure dans une tache du mois de juin 1874. Les courants ne sont cependant pas toujours composés de parties discontinues, du

Fig. 43.



moins autant que nous en pouvons juger; on croirait voir un fluide visqueux couler dans un milieu de nature différente; cet aspect rappelle plutôt encore celui de la fumée qui s'échappe d'une chandelle de suif mal éteinte et qui se répand dans l'air en formant des filets nettement tranchés.

4° Les courants composés de grains ou de feuilles qui envahissent le noyau ne tardent pas à se dissoudre : il suffit de quelques heures ou même de quelques minutes. Aussi, malgré ce flux de matière lumineuse, le noyau reste constamment noir et persiste très-longtemps. Les *fig.* 38 et 44 montrent

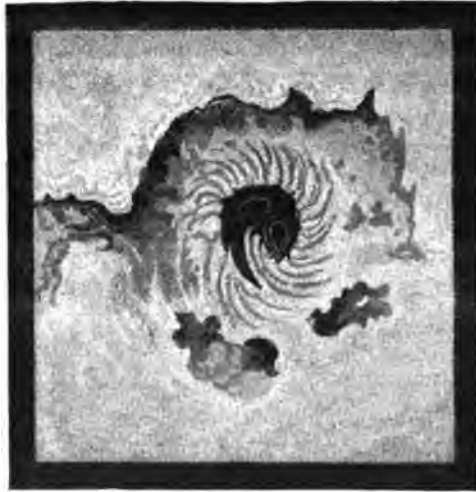
une de ces feuilles détachée et à demi dissoute; ce phénomène est assez fréquent, et nous pourrions en donner de nombreux exemples; il a été également constaté par M. Lockyer. Du reste, ce fait n'est pas particulier aux feuilles qui composent les courants; on le voit quelquefois se reproduire pour des portions considérables de la photosphère. Nous avons déjà dit que, dans la tache du 29 mai 1865 (*fig.* 31), les masses photosphériques emprisonnées dans le noyau avaient fini par se dissoudre. D'ailleurs, on trouve dans les dessins de M. Chacornac des exemples semblables à ceux que nous avons tirés de nos propres observations; on y reconnaît des courants, ou même des masses de matières lumineuses, semblables aux courants et aux masses détachées, dont nous venons de donner la description.

Il est donc certain qu'il y a au centre des taches une espèce d'aspiration qui attire la matière environnante et détermine son écoulement vers le noyau, et ce qui prouve bien ce pouvoir d'attraction exercé par les taches, c'est l'absorption des petites par les grandes. Elles se rapprochent peu à peu de la cavité principale dans laquelle on les voit bientôt disparaître. Ce phénomène se rapportant à celui du mouvement propre des taches, nous en parlerons plus tard.

5° On observe quelquefois, à l'intérieur des cratères, un mouvement de rotation très-sensible. On en voit un exemple au point *a*, dans la tache du 30 juillet 1865 (*fig.* 27). Nous donnons ici (*fig.* 44) un dessin qui montre admirablement jusqu'à quel point peut être portée cette structure tourbillonnante. Cette tache a été observée à Rome le 5 mai 1854; au même moment M. Fearnely l'observait à Christiania, et les deux dessins s'accordent parfaitement. On voyait un grand nombre de flammes enroulées en spirales tournoyer

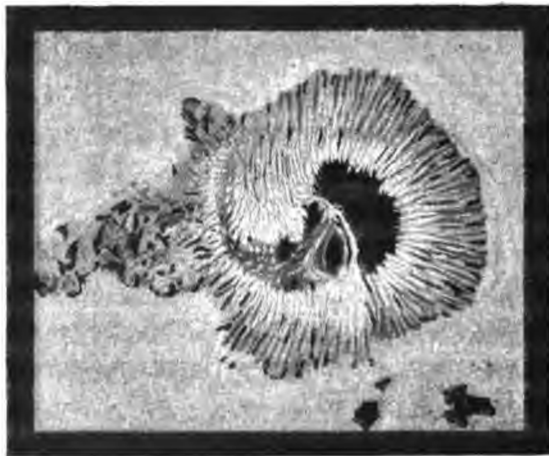
dans le noyau ; au bout de deux heures, elles étaient complétement dissoutes.

Fig. 44.



Nous reproduisons dans la *fig.* 45 une autre tache observée

Fig. 45.



le 25 septembre 1866, dans laquelle les courants montrent,

par leur disposition, qu'ils sont animés d'un mouvement rotatoire très-prononcé, mais seulement dans la partie gauche de la pénombre; car, dans toute la partie qui est à droite, les courants sont dirigés, comme à l'ordinaire, de manière à converger vers le centre. En réalité, on n'observe ces tourbillons qu'à l'époque de la formation, comme nous l'avons déjà fait remarquer à propos de la tache du 30 juillet 1865; ils se présentent souvent dans les moments de recrudescence et lorsqu'une tache est sur le point de disparaître. On a souvent cru voir des tourbillons dans des phénomènes qui ne sont que de simples changements de forme, sans aucun mouvement de rotation.

Quelques astronomes, M. Faye en particulier, sont partis de là pour établir une théorie d'après laquelle les taches ne seraient autre chose que des cyclones. Cette théorie ne nous paraît pas admissible. Si le mouvement tourbillonnant existait dans *toutes* les taches, les rayons qui constituent la pénombre devraient *toujours* être recourbés : or il n'en est rien. Si cela arrive quelquefois, c'est assez rare, car, sur trois cents taches et plus qu'on observe dans le cours d'une année, il y en a sept ou huit seulement qui présentent d'une manière bien tranchée la structure spirale qui devrait caractériser les tourbillons. On ne l'observe donc pas toujours, ce qui devrait avoir lieu dans la théorie de M. Faye. Nous pouvons même ajouter que les mouvements en spirale constituent une exception assez rare; ce sont des cas particuliers dont nous chercherons l'explication, mais qui ne peuvent pas servir eux-mêmes à expliquer un phénomène bien plus général. Ajoutons une dernière observation : non-seulement les taches ne présentent pas toutes la forme de tourbillons, mais, de plus, cette forme, lorsqu'elle existe, ne persiste pas plus d'un jour ou deux, tandis que les taches elles-mêmes peuvent subsister longtemps encore après avoir

perdu la forme spirale. Quelquefois même le mouvement tourbillonnant, après s'être graduellement ralenti, se reproduit de nouveau, mais en sens contraire du précédent. Concluons donc que cette structure, quoique très-intéressante, est purement accidentelle. En nous réservant de l'étudier plus tard, nous devons dire dès maintenant qu'on ne saurait la prendre pour base d'une théorie ayant la prétention de faire connaître d'une manière générale la nature des taches solaires.

6° La *fig.* 45 nous intéresse encore à un autre point de vue; nous y retrouvons la structure que l'astronome Dawes a caractérisée par le mot *thatched straws*, *couverture de paille*,

Fig. 46.



à cause des faisceaux de filets parallèles qui représentent assez bien un toît de chaume. Cette comparaison n'est pas heureuse; cependant elle exprime d'une manière ingénieuse la disposition des filets telle que nous l'avons décrite précédemment. Ces filets, si on les examine avec attention, ne peuvent être comparés à des brins de paille; ils sont généralement un peu tortueux, renflés à une extrémité en forme de massue, ou plutôt comme des courants de lave retardés dans leur mouvement par la résistance du milieu qui les environne. Leur forme générale est indiquée par la *fig.* 46. Nous avons cherché à déterminer leur épaisseur, et nous avons trouvé que l'extrémité renflée a une largeur $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{3}$ de seconde, ce qui fait 200 ou 300 kilomètres. Le reste de la tige peut avoir de 100 à 200 kilomètres de largeur.

7° Les taches possèdent souvent une espèce de queue composée de taches plus petites ; ces appendices se trouvent ordinairement dans ce que nous appellerons la partie postérieure de la tache, c'est-à-dire dans la partie opposée à celle vers laquelle se dirigent les différents points du Soleil dans son mouvement de rotation. Cette rotation, pour l'hémisphère que nous voyons de la Terre, ayant lieu de l'est à l'ouest, les queues se trouvent donc à la partie orientale des taches,

Fig. 47.



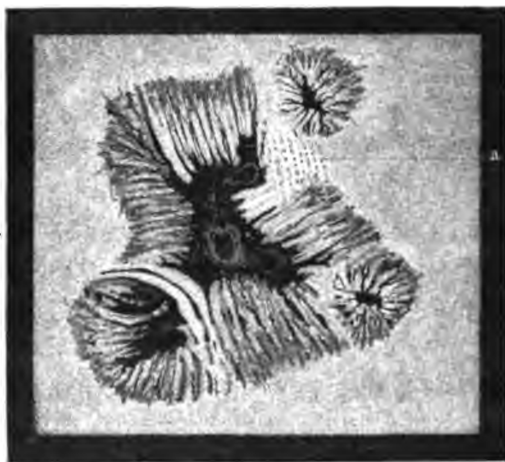
et dans une lunette qui donne des images renversées on les verra du côté opposé, c'est-à-dire à l'ouest.

La tache représentée dans la *fig.* 45 nous présente une queue composée d'une foule de petites taches irrégulières entremêlées de matière lumineuse, et dispersées sans ordre dans la pénombre. Cette disposition est fréquente, et nous en donnons un autre exemple dans la *fig.* 47 ; c'est une tache vue le 16 janvier 1866, à $1^h 45^m$: on en observe souvent de semblables. Son noyau se prolonge dans la partie postérieure d'une manière remarquable et exceptionnelle. Ordinairement

le noyau principal est rond et isolé, tandis qu'en arrière on voit une queue composée de petites taches séparées les unes des autres, ou quelquefois de facules brillantes. Nous ferons remarquer que, dans cette *fig.* 47, les courants de la pénombre sont recourbés à l'extrémité qui touche le noyau, comme s'ils rencontraient une résistance, ou comme s'ils se soulevaient de bas en haut.

8° Dans la période de tranquillité, lorsque les taches sont

Fig. 48.



rondes, les courants sont presque toujours dirigés vers le centre de figure; mais, dans les taches irrégulières, ils sont généralement groupés par faisceaux parallèles dirigés perpendiculairement aux bords. On peut déjà remarquer cette disposition dans la *fig.* 45; mais on en voit un exemple plus remarquable dans une tache observée le 9 avril 1870 (*fig.* 48). On voit au point *a* deux systèmes de courants superposés l'un à l'autre et se croisant à angle droit, ce qui suppose une différence considérable de niveau.

9° Nous avons déjà vu qu'il existe probablement aussi des différences de niveau pour ces filets lumineux qu'on désigne sous le nom de *ponts*, et qui sont en réalité des courants en forme d'arcs-boutants suspendus et flottant dans un milieu aériforme. Telle est du moins l'impression qu'on éprouve à première vue, impression qui est parfaitement confirmée par l'étude des dessins, en particulier par l'étude des apparences que présenta la tache du 30 juillet 1865 (*fig.* 27 et 28), lorsqu'elle arriva auprès du bord. Il est difficile de se rendre compte de ces arcs si brillants qui sont dirigés obliquement par rapport aux courants inférieurs, si on ne les suppose pas suspendus à une grande hauteur.

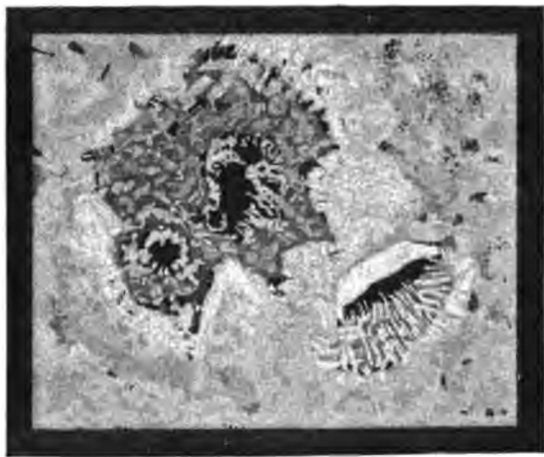
La tache représentée dans la *fig.* 48 nous montre que les courants ordinaires se croisent en se superposant, ce qui montre qu'ils se trouvent dans des plans différents. On voit de plus qu'ils sont loin d'être transparents, puisque ceux qui sont plus élevés empêchent de voir les autres.

10° Il ne faudrait cependant pas supposer que toutes les taches qui paraissent rondes lorsqu'on les examine avec un faible grossissement aient toujours une structure aussi simple que celle dont nous venons de parler. La *fig.* 49 représente une partie de la grande tache du 30 juillet, telle qu'on la voyait le 23 août 1865. On y remarque deux cavités qui paraissent rondes toutes les deux, mais dont les structures sont bien différentes : dans l'une, la pénombre est remplie de filets recourbés ; dans l'autre, elle est remplacée du côté gauche par une énorme facule. Ajoutons cependant que cette phase appartient à l'époque où la tache était sur le point de disparaître, et l'on sait que dans cette dernière période le phénomène ne présente plus la même régularité.

Notre longue expérience nous a appris que, dans l'existence d'une tache, il faut distinguer trois périodes : la pé-

riode de formation, celle de calme et celle de dissolution. Lorsqu'une tache est sur le point de se fermer, la matière lumineuse qu'elle attire n'est plus régulièrement dirigée vers le centre : il semble que les masses photosphériques, ne trouvant plus de résistance à vaincre, se précipitent pêle-mêle comme pour combler une cavité. Il est impossible de décrire en détail les phases que présentent les taches irrégulières, mais on peut toujours y remarquer deux choses : 1° l'exi-

Fig. 49.



stence des filets lumineux qui caractérisent leur structure; 2° la convergence de ces filets vers un ou plusieurs centres.

Lorsque plusieurs taches sont réunies de manière à former un seul groupe, on voit les noyaux qui les composent se séparer l'un de l'autre d'une manière bien nette; puis, après un jour ou deux, ils se rapprochent pour se réunir et se confondre. Les masses photosphériques se dissolvent pour reparaître et se dissoudre de nouveau dans un intervalle de temps quelquefois très-court. Le lecteur pourra se faire une idée de ces bouleversements par la photographie de M. Rutherfurd,

que nous avons reproduite dans la *fig.* 7; on y voit un groupe composé de quatre noyaux distincts séparés par des bandes lumineuses. Ces phénomènes très-complexes ne sont sujets à aucune loi précise; la seule chose que l'on puisse dire d'une manière générale, c'est que les régions où se trouvent les taches sont le siége d'immenses mouvements dans lesquels la matière parcourt des milliers de kilomètres en quelques secondes.

Nous finirons en énonçant quelques conclusions auxquelles nous sommes conduits par tout ce que nous avons exposé dans ce paragraphe. 1° Ces phénomènes ne peuvent avoir pour siége un corps solide : ils se produisent dans une masse fluide et dont la fluidité est analogue à celle des gaz; la constitution de ce milieu doit donc être comparée à celle des flammes ou des nuages. 2° Les détails que nous avons donnés sur la constitution de la pénombre et sur les phénomènes qui s'y produisent nous montrent avec évidence que ce n'est pas la masse obscure qui envahit la matière lumineuse, mais que c'est au contraire la matière lumineuse qui se précipite dans les régions obscures : souvent même la masse brillante semble surnager au-dessus des masses plus sombres qui constituent le noyau. 3° Les apparences que présente la pénombre peuvent être produites de deux manières : par des courants isolés ou par des voiles légers et continus. Ces deux éléments se trouvent d'ordinaire réunis ensemble. Les phénomènes que nous allons étudier ne feront que confirmer ces conclusions.

§ II. — *Phénomènes observés dans les noyaux.*

1° Les noyaux ne sont pas absolument noirs, comme on pourrait le croire au premier abord; ils présentent même une grande diversité dans la teinte plus ou moins obscure qui les caractérise. Si l'on compare le noyau d'une tache avec le disque d'une planète, Mercure par exemple, au moment de son passage sur le Soleil, on trouve une très-grande différence. Le noyau n'est donc pas absolument noir; par conséquent il doit émettre une certaine quantité de lumière qui n'est insensible qu'à cause du contraste produit par l'éclat de la photosphère. C'est ainsi que les satellites de Jupiter, lorsqu'ils traversent le disque de la planète, s'y détachent comme des points noirs, bien qu'ils soient éclairés par le Soleil, parce que leur éclat est trop faible pour supporter la comparaison.

Ceux qui regardent les taches comme des scories solides, n'ayant point d'éclat par elles-mêmes, doivent trouver là une difficulté sérieuse; pour répondre à cette objection, ils disent que sur le fond noir des taches nous projetons le faible éclat de l'atmosphère solaire; la planète Mercure se trouvant en dehors de cette atmosphère doit paraître plus noire que les noyaux, bien qu'en réalité les uns soient, par eux-mêmes, aussi obscurs que les autres. Cette solution peut paraître ingénieuse au premier abord, mais nous ferons remarquer que la lumière diffuse de l'atmosphère solaire est presque complétement arrêtée par les hélioscopes que nous employons. D'ailleurs, sans attendre le passage d'une planète, nous pouvons répondre par une observation facile à faire en tous temps. Qu'on examine le fond du ciel, aussi près que pos-

sible du disque solaire, à une distance assez petite pour rencontrer certainement l'atmosphère du Soleil et la lumière qui lui appartient, on reconnaîtra sans peine que, même dans ces conditions, le fond ainsi observé paraît plus noir que les noyaux. Galilée avait donc bien raison lorsqu'il disait que le noyau d'une tache, vu dans les ténèbres, nous éclairerait plus que les autres astres, et qu'il nous produirait un effet comparable à celui d'une partie égale de la photosphère. Nous rencontrerons plus tard une confirmation éclatante et inattendue de cette pensée du savant astronome.

2° Le noyau d'une tache n'est pas toujours également et uniformément obscur dans toute son étendue; on y observe souvent des parties beaucoup plus noires qui ressemblent à des trous. Cette observation est due à l'astronome anglais Dawes, qui a étudié ce phénomène avec soin. Les *fig.* 44, 47 et 48 nous montrent ainsi, dans l'intérieur d'un noyau plus large, des régions à peu près rondes qui sont d'un noir plus foncé que les parties voisines. Nous devons en conclure que toute cette surface est recouverte de voiles et de nuages de différentes densités.

3° Les noyaux ne sont pas plus invariables que les pénombres; les changements qu'ils éprouvent sont quelquefois très-rapides, ce qui paraît bien difficile à concilier avec l'opinion qui les regarde comme des corps solides. L'observation attentive faite avec de puissants instruments nous a prouvé que toutes leurs variations sont produites par les masses photosphériques qui les envahissent de différentes manières et par les courants partis de la pénombre qui viennent à chaque instant modifier leurs formes et leur aspect. Les taches circulaires présentent généralement plus de calme : elles conservent leurs formes pendant plus longtemps; mais dans le cours de leur durée elles subissent cependant des

modifications qui, pour être beaucoup plus lentes, n'en sont ni moins sensibles ni moins évidentes.

4° Les plus anciens observateurs avaient déjà remarqué que les taches qui se forment assez vite disparaissent en fort peu de temps. Quelques-unes ont probablement une cause toute superficielle, tandis que d'autres sont dues à des mouvements provenant des profondeurs du Soleil. Ces dernières durent plus longtemps, mais elles sont sujettes à de grandes variations, et l'on peut reconnaître des moments de recrudescence dans l'action qui les produit. En 1866, nous avons observé plusieurs taches qui ont fait jusqu'à trois et quatre révolutions, et plusieurs fois, au moment où elles étaient sur le point de disparaître, nous avons constaté cette recrudescence de la manière la plus évidente. Presque toujours ce phénomène est accompagné d'un changement de position. Ce mouvement a généralement lieu dans le sens de la rotation du Soleil. Il y a là quelque chose d'analogue à la position des taches par rapport aux queues qui les suivent ([1]). Cassini cite des taches qui ont subsisté pendant quatre ou cinq révolutions consécutives, mais les observateurs n'ont pas remarqué si leurs dimensions restaient les mêmes et si elles occupaient toujours la même position. Des mesures que nous avons prises, et que nous reproduirons plus tard, il résulte que dans ces longues périodes les taches sont sujettes à de fréquentes transformations. Quelquefois encore, nous avons vu, ainsi que d'autres astronomes, une tache se former à l'endroit où la précédente avait disparu quelque temps auparavant. De la Lande en a cité un grand nombre d'exemples; Cassini a fait des observations semblables, et M. Carrington

---

([1]) Voir § I, 7°, p. 91.

a, comme nous, confirmé ces faits en ajoutant de nombreuses observations à celles de de la Lande et de Cassini.

5° Assez souvent les taches semblent se diviser. Cette division peut n'être qu'apparente, un nouveau noyau se formant près de l'ancien et s'en séparant de plus en plus par un mouvement rapide vers la partie antérieure. Mais souvent aussi la division est réelle, et alors elle se fait par un mécanisme bien simple : la matière lumineuse se précipite des bords, envahit l'intérieur, forme des ponts et partage le noyau en plusieurs parties. Ces ponts ont un éclat très-vif et comparable à celui de la photosphère, ce qui prouve qu'au lieu de s'enfoncer dans les profondeurs de la partie obscure ils sont comme suspendus dans les hautes régions d'où ils semblent dominer les abîmes ou les masses sombres qui sont au-dessous d'eux. La tache du 25 septembre (*fig.* 45) montre une de ces lignes lumineuses, qui la sépare en deux parties : l'une est composée d'une foule de petits noyaux, l'autre forme une seule masse noire sans division. Deux jours après, cette ligne était plus grosse, les petites taches étaient dissoutes, il y avait alors deux noyaux. Quatre jours plus tard, le pont disparut, les deux noyaux se confondirent, et il ne resta qu'une tache simple.

La *fig.* 50 montre d'une manière assez claire le mécanisme de la division par l'apparition des langues de feu qui envahissent le noyau de tous côtés.

Les anciens attribuaient ce phénomène à la rupture des croûtes solides qui, d'après eux, formaient les taches : cette théorie est inconciliable avec la véritable structure de la photosphère et celle des parties intérieures des taches.

Dans ces derniers temps, on a voulu expliquer le phénomène dont nous parlons en le comparant avec ce qui a lieu dans notre atmosphère lorsqu'un vaste tourbillon se divise

en plusieurs autres; mais la comparaison ne nous paraît pas justifiée par les faits. Les langues brillantes qui envahissent les taches et finissent par les subdiviser ne présentent rien dans leur développement qui ressemble aux phases qu'on observe dans la rupture d'un tourbillon. Quelquefois, d'ailleurs, la division d'une tache n'est qu'apparente : cette illusion est due à la production d'une seconde tache qui se forme à côté de l'ancienne; elles se séparent quelquefois de plus en plus;

Fig. 50.



dans d'autres circonstances, elles se rapprochent davantage et finissent par se fondre en une seule après avoir été séparées pendant quelques jours.

La division des noyaux précède ordinairement leur dissolutiòn et leur disparition. De même, lorsque les taches sont sur le point de disparaître, on voit souvent diminuer leurs dimensions : les noyaux deviennent de plus en plus petits; bientôt ils se réduisent à des points et finissent par devenir invisibles. Il arrive bien quelquefois que les tourbillons qui se forment dans un fluide se subdivisent ou se fondent en-

semble; mais leurs subdivisions ne peuvent être produites par des lignes roides : elles résultent toujours de segmentations circulaires.

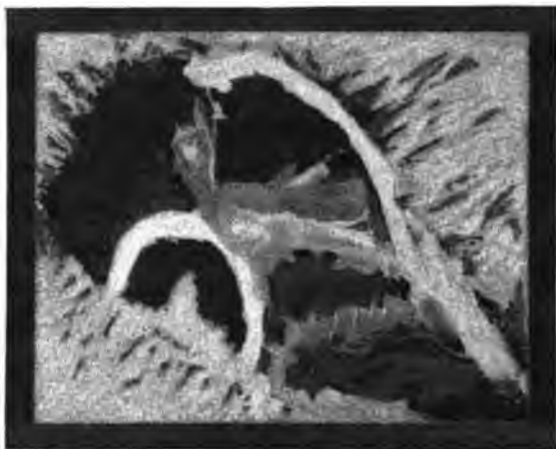
Nous venons de dire que les taches disparaissent souvent en se rétrécissant : c'est précisément le contraire de ce qui arrive pour les cyclones qui, en s'élargissant, diminuent d'intensité et finissent par disparaître en se confondant avec la masse d'air tranquille qui les entoure. Il est donc impossible d'établir une comparaison entre ces deux ordres de phénomènes.

§ III. — *Voiles roses à l'intérieur des taches.*

Outre la division proprement dite, due à des ponts dont la matière possède un éclat comparable à celui de la photosphère, il se présente souvent un autre phénomène que nous avons eu l'occasion de remarquer déjà, et qui demande une étude spéciale. Nous voulons parler des voiles très-minces, de couleur rose, qu'on voit souvent dans l'intérieur des taches, et dont nous avons un exemple dans la *fig.* 51. Herschel avait déjà constaté l'existence de ces voiles, il les regardait même comme constituant la pénombre; il est probable en effet qu'ils sont constamment mêlés aux courants et aux feuilles. Plus tard, Dawes aperçut ce phénomène d'une manière beaucoup plus nette en mettant à l'oculaire de sa lunette un diaphragme percé d'un très-petit trou; il vit, en observant de grandes taches, que dans le noyau il y a des parties plus noires, d'autres moins obscures, d'autres qui sont recouvertes de voiles très-minces. Nous-mêmes, nous avons vérifié plus d'une fois l'exactitude des observations de Dawes; mais surtout nous avons constaté que les voiles sont,

non pas toujours, mais bien souvent colorés en rouge. Ils sont du reste assez fréquents, et si les observateurs qui nous ont précédé ne les ont pas remarqués, cela tient aux verres colorés qu'ils employaient, et qui masquaient complétement la couleur des objets; mais, avec un hélioscope polariseur, nous avons presque toujours pu constater leur existence dans les grandes taches, surtout dans leur période de formation. On a objecté aussi que cette coloration pourrait être due à un dé-

Fig. 51.

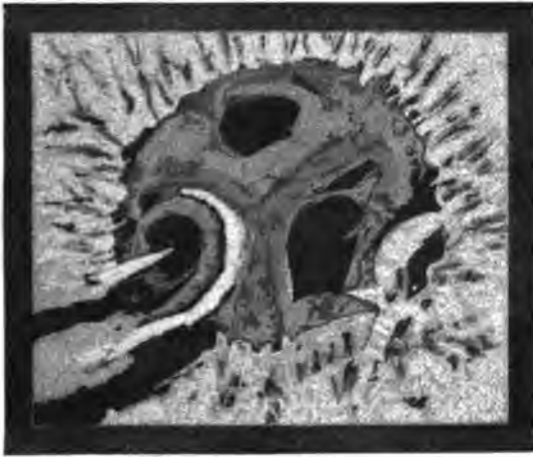


faut d'achromatisme. Cette confusion, possible peut-être pour les anciens astronomes, est absolument impossible pour nous; les nuages rouges que nous observons présentent des formes si nettement tranchées, si différentes des colorations vagues que produit l'aberration de réfrangibilité, qu'il suffit de les avoir observées pour être fixé à cet égard, et le fond noir du noyau sur lequel ils se projettent contribue singulièrement à rendre toute confusion impossible.

L'origine de ces voiles rouges et la manière dont ils se développent montrent encore avec évidence qu'ils existent réelle-

ment et que nous ne sommes pas trompés par une illusion d'optique. Au mois de février 1866, apparut une tache énorme que nous avons suivie avec beaucoup de soin. Un trouble considérable se manifesta d'abord dans une vaste région, occupant en longitude les $\frac{5}{22}$, c'est-à-dire un peu moins du quart du diamètre solaire : aussi le phénomène était-il visible à l'œil nu. On aurait dit une immense crevasse présentant les formes les plus bizarres, parmi lesquelles sem-

Fig. 52.



blait dominer une courbe en forme de S. Au milieu de ce chaos, nous remarquâmes une région dans laquelle apparaissaient de grandes masses de voiles rouges, comme le représente la *fig.* 51.

La partie la plus remarquable était un pont en forme d'arc ou de fer à cheval, formé d'une matière extrêmement brillante, et à l'intérieur une espèce de promontoire lumineux semblable à une facule.

Le lendemain 17 (*fig.* 52), nous trouvâmes l'arc brisé; le tronçon était terminé en pointe mince et effilée; la partie dis-

parue était remplacée par un voile rouge; d'autres voiles, rouges et blancs, couvraient le reste de la tache. De l'autre côté du noyau, le grand courant qui existait la veille avait presque complétement disparu : il était remplacé par une traînée rouge. Nous avions à peine fini le dessin, que le crochet qui se trouve à gauche s'était évanoui; la base seule

Fig. 53.



était encore visible, et le reste était remplacé par un voile de teinte rose.

Une question se présentait alors d'elle-même. Y a-t-il dans ces phénomènes une transformation réelle d'arcs brillants en

Fig. 54.



voiles rouges, ou bien faut-il y voir une superposition purement accidentelle? Pour résoudre cette importante question, nous avons pendant longtemps, et avec beaucoup de soin, surveillé et étudié les taches, et nous avons pu nous assurer que les courants lumineux se transforment quelquefois en voiles roses.

Le 23 janvier 1866, nous examinions une tache en forme

de ∞ ; deux jets de langues brillantes s'élançaient de part et d'autre, et paraissaient devoir la diviser par un pont.

La *fig.* 53 représente l'une de ces gerbes de flammes vue à 10^h45^m. Cinquante minutes plus tard, les langues de feu s'étaient effilées à leur extrémité ; elles présentaient la forme indiquée dans la *fig.* 54.

Fig. 55.



Au bout de dix minutes, en remettant l'œil à la lunette, on les vit transformées en voiles (*fig.* 55). Enfin les voiles se dissipèrent, et à 1^h45^m il ne restait qu'une gerbe de flammes plus courtes qu'au commencement (*fig.* 56).

Fig. 56.

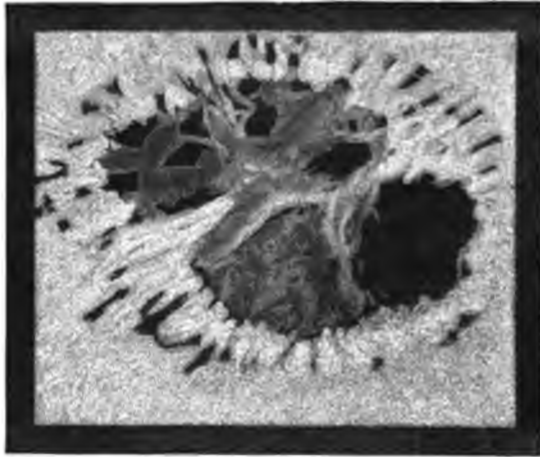


On ne saurait donc douter de la réalité de cette transformation. Un phénomène de cette nature ne peut s'expliquer par de prétendues illusions que produiraient les hélioscopes, car nous devons ces découvertes aux hélioscopes polariseurs qui ne sauraient colorer une partie du champ sans le colorer tout entier. De plus, il faudrait être bien mauvais observateur pour confondre, comme on a prétendu que nous le faisions, les couleurs que présentent les voiles avec

les apparences qui résulteraient d'un défaut d'achromatisme dans la lunette.

Terminons en citant une dernière observation. Le 23 septembre 1866, le Soleil, se trouvant dans une période de tranquillité, présentait une des plus belles taches nucléaires que nous ayons jamais vues. Son noyau, vu avec un faible grossissement, ressemblait à un ovale, ou plutôt à un losange dont les angles seraient émoussés. La *fig.* 57 la représente vue

Fig. 57.



avec un grossissement plus considérable. On y reconnaît la structure rayonnée que possède ordinairement la pénombre; le milieu est tout rempli de voiles roses et blancs, qui s'entre-croisent dans toutes les directions. Si la coloration était due à un défaut de l'appareil, comment expliquer qu'elle soit visible dans la partie centrale, où les teintes sont plus faibles, et non dans les endroits où la lumière est plus vive (1)?

(1) Dans ce dessin, les voiles intérieurs sont seuls représentés avec précision; les détails de la pénombre ne sont qu'ébauchés.

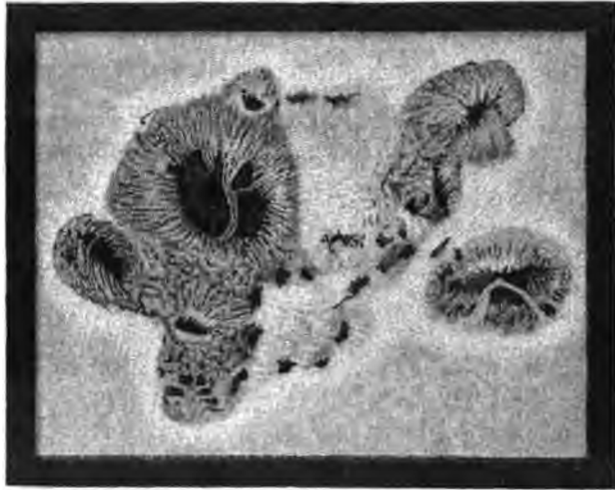
Depuis cette époque nous avons souvent trouvé ces masses rouges dans l'intérieur des taches, et nous en avons constaté la nature chimique, par des procédés que nous ferons connaître plus tard.

Nous arrivons donc à cette conséquence, que dans les taches du Soleil il y a des amas de voiles roses qui paraissent analogues à ces flammes qu'on aperçoit autour du disque de la Lune pendant les éclipses solaires, et que l'on connaît sous le nom de *protubérances rouges*. De plus, ces voiles nous paraissent analogues aux *cirri*, ou plutôt à de légers brouillards, tandis que les grains peuvent être comparés à des *cumuli*. Rien ne nous prouve que ces *cirri* forment une couche continue plus basse que les *cumuli;* nous voyons ces masses entremêlées les unes avec les autres, et il est bien difficile de déterminer leur position relative. Nous pouvons seulement affirmer que les pénombres ne sont pas exclusivement composées des voiles comme le supposait W. Herschel, mais qu'elles contiennent encore des grains et des courants qui *paraissent* superposés aux voiles.

Toutes ces particularités se trouvent bien souvent réunies dans une seule et même tache. La *fig.* 58, que nous avons déjà étudiée à d'autres points de vue, nous en montre un échantillon qui nous fait bien voir jusqu'à quel point la structure d'une tache peut être compliquée. Dans cette observation, faite le 14 avril 1869 à 10 heures, le noyau principal était traversé par un pont composé d'une double ligne de langues dont l'ensemble forme une courbe sinueuse; l'intérieur de ce noyau est plein de voiles, et l'on y remarque un trou plus noir. Un peu plus bas, du côté gauche, on voit une espèce de tourbillon dont les filets, de part et d'autre, se dirigent vers la partie supérieure en suivant les lignes courbes convergentes. Plus bas encore, nous remarquons une cou-

ronne elliptique dont la partie supérieure semble lancer de nombreux filets, tandis que la partie inférieure est remplie de plaques noires. A droite de cette partie principale et très-compliquée, nous trouvons deux autres régions qui paraissent tendre vers la forme circulaire; leurs pénombres sont remplies de courants qui convergent vers le centre, et la grande plaque qui se trouve plus bas présente un singulier

Fig. 58.



courant angulaire qui revient sur lui-même en rebroussant chemin et qui paraît suspendu au-dessus du noyau. Tout le contour de la tache est bordé d'une lumière assez vive, et de facules faciles à saisir. Le diamètre total est de 2′ 37″, celui des deux cavités principales est de 1′ 25″.

Rappelons-nous que ces formes ne sont que transitoires : la veille il n'y avait rien qui ressemblât à notre dessin; le lendemain c'était à peine si l'on aurait pu reconnaître quelque chose de ce qu'on avait observé vingt-quatre heures plus tôt. Cela posé, des formes si bizarres, des variations si ra-

pides peuvent-elles convenir à des scories solides nageant sur une lave liquide et incandescente? Ceux qui ont soutenu cette hypothèse n'ont évidemment pas eu l'occasion d'observer une tache semblable avec un bon instrument; une seule observation aurait suffi pour les convaincre.

Il est, au contraire, très-facile de tout expliquer, et surtout la suspension apparente des ponts dont nous avons parlé précédemment, si l'on admet que le Soleil est composé d'une masse possédant une fluidité analogue à celle des gaz, des vapeurs ou des nuages. Il ne faut pas même admettre, avec W. Herschel, que les voiles forment à la surface du Soleil une couche continue qui s'ouvre toujours parallèlement aux noyaux; car nous avons vu souvent des langues de feu se projeter bien au delà des voiles, lors même que ceux-ci forment le fond de la pénombre. Tout en regardant comme certaine l'existence de deux espèces de nuages, nous ne pouvons donc pas admettre l'existence de deux couches distinctes et continues.

Sans doute l'explication de toutes ces apparences n'est pas facile, et nous ne l'aborderons pas ici; les observations spectrales nous fourniront des données nouvelles, et nous pourrons alors dire toute notre pensée; qu'il nous suffise, pour le moment, d'avoir montré la singulière constitution de la photosphère solaire, et d'avoir conclu de ses mouvements si vastes, si rapides et si complexes, qu'aucune substance solide ne peut expliquer les phénomènes qui se produisent à la surface du Soleil, et en particulier celui des taches.

§ IV. — *Ce qui se passe à l'extérieur des taches : facules.*

Les taches sont habituellement environnées de régions plus brillantes que le reste de la photosphère, auxquelles on

donne le nom de *facules*. En général on fait peu d'attention à ce phénomène qui paraît purement accessoire ; c'est bien à tort, car nous ne tarderons pas à voir combien il est important d'en tenir compte pour arriver à comprendre la véritable nature des taches. Malheureusement, il est difficile d'étudier les facules avec quelque précision, si ce n'est à une petite distance du bord, car au centre et tout près du bord on les aperçoit difficilement. On peut cependant les suivre jusqu'au centre du disque, en observant l'image du Soleil projetée sur un carton blanc, dans une chambre parfaitement obscure, dans laquelle ne pénètrent que les rayons destinés à produire l'image.

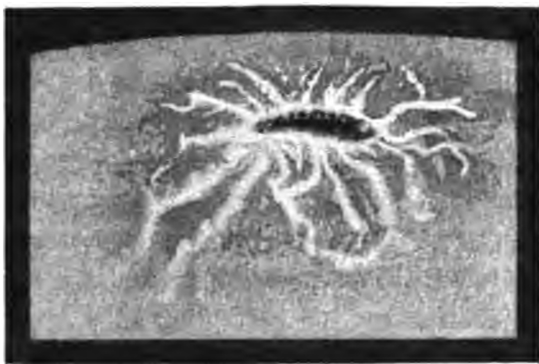
Une tache est toujours environnée d'une couronne plus ou moins large de facules ; leurs formes et leur disposition varient beaucoup, non-seulement d'un jour à l'autre, mais souvent en quelques minutes. Cette région est donc le siége d'une agitation considérable et dont l'étendue est beaucoup plus grande que celle de la tache proprement dite.

Il est difficile de donner quelques règles générales pour ce phénomène bizarre et capricieux. Il faut distinguer entre les taches irrégulières et les taches cratériformes. Dans celles-ci, les facules se détachent du contour de la pénombre comme des ramifications ayant le noyau pour centre, et elles s'épanouissent dans une région trois ou quatre fois plus grande que la tache elle-même. Elles forment une espèce d'anneau brillant autour des taches circulaires qui sont parvenues à la période de tranquillité. Quelques-unes d'entre elles, plus brillantes que les autres, sont isolées et percées d'un trou noir en leur milieu, trou qui se développe souvent de manière à produire une véritable tache. Autour des taches irrégulières, elles sont distribuées au hasard ; on les voit même flotter dans les noyaux, comme des nuages floconneux ou

comme des fragments de matière photosphérique brillant d'un vif éclat.

Les ramifications formées par les facules ne se distinguent bien nettement qu'à l'époque où le cratère qu'elles environnent se trouve dans la position la plus favorable, c'est-à-dire à une distance convenable du bord. C'est ce que nous voyons dans la *fig.* 59, représentant une de ces taches rondes observée par M. Tacchini, le 3 décembre 1865. Elle est entourée d'une

Fig. 59.



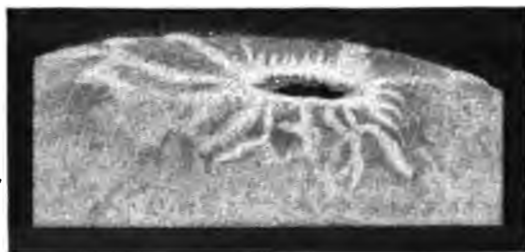
belle facule de laquelle rayonnent des ramifications curvilignes qui se divisent en branches très-irrégulières. Lorsque, le lendemain, le cratère fut arrivé plus près du bord, on remarqua une proéminence sur le contour lui-même, à l'endroit où il était traversé par la facule (*fig.* 60). Le 29 juin 1866, nous avons fait une observation semblable, et M. Tacchini en a dessiné un grand nombre d'autres. Dans un de nos dessins, exécuté le 14 mars 1866, deux branches, plus brillantes que les autres, renfermaient entre elles un espace plus sombre présentant presque les rudiments d'un second cratère.

Il n'est pas rare de voir des facules très-vives, isolées de toute tache, produire sur le bord du disque une proémi-

nence sensible; souvent alors le spectroscope fait savoir qu'il y a une éruption en ce point.

Nous venons de dire que les facules sont plus facilement visibles près du bord que vers le centre du disque; pour expliquer ce phénomène, on peut admettre deux hypothèses. 1° que la facule est en réalité plus élevée que le reste de la photosphère, ou bien 2° supposer que c'est une illusion produite par un éclat plus considérable de sa matière lumineuse. La première explication est plus simple, et elle s'accorde

Fig. 60.



parfaitement avec les observations spectrales. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de supposer que la région des facules est plus lumineuse que les autres points de la photosphère; on comprend facilement comment le relief des facules peut les faire paraître plus brillantes, car, en s'élevant au-dessus du niveau général, elles diminuent l'épaisseur de l'atmosphère absorbante qui les recouvre, et parviennent ainsi à lancer dans l'espace une quantité de lumière plus considérable. Il n'est pas nécessaire qu'elles s'élèvent beaucoup au-dessus du niveau général pour se trouver au-dessus de la couche absorbante, car nous verrons bientôt que cette couche est assez mince. Cette explication ne peut cependant pas s'appliquer à tous les cas; il est des circonstances où l'on doit admettre qu'il y a réellement une plus grande intensité lumineuse; nous

en verrons la preuve lorsque nous parlerons des découvertes dues au spectroscope.

Les facules sont intimement liées avec les taches. Lorsqu'elles sont isolées, elles finissent souvent par se percer en leur centre d'un pore noir. Elles précèdent habituellement la formation des taches, et alors elles sont extrêmement brillantes; souvent aussi elles restent pendant quelque temps sur l'emplacement d'une tache disparue.

Elles sont quelquefois disposées de manière à former de véritables queues à la suite des taches. M. de la Rue a examiné 1137 taches photographiées à l'Observatoire de Kew; 584 présentaient ces facules à gauche, c'est-à-dire dans la partie postérieure; 508 avaient une disposition régulière et symétrique; 45 seulement avaient une espèce de queue à droite, c'est-à-dire dans la partie antérieure.

Cette disposition est une conséquence de la position qu'occupent, par rapport aux taches, les queues proprement dites dont nous avons parlé précédemment; les facules se trouvent plus abondamment répandues dans la région la plus bouleversée, ce qui confirme l'opinion qu'elles correspondent aux parties saillantes de la photosphère, car là où l'agitation est si considérable il doit y avoir de grandes différences de niveau.

On voit quelquefois des facules disposées en forme de couronne circulaire, environnées de ramifications divergentes, absolument comme celles dont nous avons donné le dessin d'après M. Tacchini, sans cependant qu'il y ait aucune tache à l'intérieur. Cela prouve que la masse noire qui constitue le noyau n'est qu'accidentelle; les cratères peuvent se développer sans avoir à leur intérieur cette masse noire qu'on remarque davantage. Nous devons dire que cette particularité se présente rarement.

Les facules ne brillent pas d'un éclat uniforme tout autour des taches; dans la partie antérieure elles sont plus petites, mais plus vives; dans la partie postérieure, elles sont plus nombreuses, plus étendues, mais moins brillantes. Elles sont quelquefois indépendantes des taches, et alors leurs dimensions peuvent devenir très-considérables; nous en avons vu qui s'étendaient comme une vague lumineuse sur la moitié du disque, mais en général elles sont beaucoup plus petites. Leurs formes sont très-variables et jamais il ne nous est arrivé de les retrouver au bout de vingt-quatre heures identiques à elles-mêmes.

Les zones occupées par les facules sont plus étendues que celles où l'on observe les taches; on en rencontre quelquefois jusque près des pôles, mais en général elles ne vont pas au delà de 60 degrés, et c'est dans la zone des taches qu'elles sont plus nombreuses. Aux époques de grande agitation, on remarque près des pôles des calottes plus obscures, bordées de granulations plus vives qui tracent quelque chose d'analogue à des zones polaires; ces granulations sont de véritables facules, mais assez faibles. Elles sont quelquefois nettes et bien tranchées; mais, dans les époques de calme, il ne reste que des groupes isolés, peu lumineux, difficiles à distinguer.

Avant de formuler une hypothèse définitive pour relier et expliquer les faits que nous venons d'exposer, nous allons suspendre un instant l'examen des phénomènes physiques que présentent les taches pour étudier leurs mouvements. Avant de commencer cette nouvelle étude, nous allons résumer dans un dernier paragraphe ce que nous venons de discuter assez longuement.

§ V. — *Conclusions relatives à la structure des taches.*

Les phénomènes que nous venons d'étudier en détail nous conduisent aux conclusions suivantes :

1° Les taches sont le résultat de grands bouleversements qui s'accomplissent dans la masse dont le Soleil se compose. De ces bouleversements il résulte pour la surface extérieure de grandes différences de niveau, des soulèvements et des dépressions; ces dépressions forment dans la photosphère des cavités plus ou moins régulières environnées d'un bourrelet vif et saillant. La profondeur de ces cavités n'est pas très-considérable . les mesures de Wilson et les nôtres montrent qu'elle est à peine égale au tiers du rayon terrestre, c'est-à-dire 2126 kilomètres; en tous cas, elle ne dépasse jamais un rayon terrestre, c'est-à-dire 6377 kilomètres. Quelle que soit l'incertitude de ces résultats numériques, si nous avons égard aux dimensions du globe solaire, nous devons dire que ce sont des phénomènes purement superficiels.

2° Ces cavités ne sont pas vides; la résistance qu'elles opposent à la marche des courants lumineux prouve qu'elles sont remplies de vapeurs plus ou moins transparentes, et nous rencontrerons encore d'autres preuves de cette vérité. On regardait autrefois la profondeur des taches comme mesurant l'épaisseur de la couche photosphérique au-dessous de laquelle on plaçait un noyau obscur. Il est impossible maintenant de soutenir cette opinion : la profondeur des taches mesure simplement l'épaisseur de la couche absorbante qui arrête les rayons de la photosphère située au-dessous. Rien ne prouve, en effet, que la couche lumineuse soit si mince et qu'elle soit complétement déchirée là où se trouve une tache. L'existence d'un noyau solide et obscur au centre du

Soleil n'est qu'une hypothèse; aucun fait positif, aucune observation directe n'en prouve l'existence. On est porté à faire cette hypothèse parce que, involontairement et sans s'en rendre compte, on assimile le Soleil à notre globe terrestre, où nous voyons une masse solide environnée d'une atmosphère gazeuse; mais cette assimilation est loin d'être légitime : elle ne justifie nullement l'hypothèse absolument gratuite du noyau solaire. Nous l'avons déjà dit, les apparences que présentent les taches peuvent s'expliquer par la simple interposition d'une masse vaporeuse entre la photosphère et l'observateur. La couche lumineuse peut donc exister au-dessous des taches, et il nous est impossible de dire jusqu'à quelle profondeur elle s'étend.

3° Lorsque nous parlons de *cavités* dans la photosphère, nous voulons dire qu'il y a une dépression dans la surface éclairante, d'où il résulte une sorte de cratère rempli de vapeurs sombres qui s'enfoncent plus ou moins dans la masse lumineuse, et arrêtent, par leur pouvoir absorbant, les rayons émis par les couches inférieures. Les grains et les courants qui composent la pénombre, les ponts qui traversent les taches, sont des masses de matière photosphérique dont les unes plongent en partie dans la matière obscure des noyaux pour s'y dissoudre, les autres flottent suspendues à des hauteurs plus considérables. On comprend maintenant comment Herschel a pu être conduit à formuler sa théorie : observateur très-attentif, il avait aperçu que c'était la masse brillante qui envahissait la région obscure; de là il fut conduit à admettre que le Soleil est composé d'un noyau central obscur recouvert d'enveloppes brillantes dont les solutions de continuité formeraient les taches en laissant voir la masse obscure qui est au-dessous d'elles. Cette théorie n'est pas absolument fausse; l'erreur consiste à supposer que la couche

noire enveloppe complétement le Soleil. Il n'y a, au contraire, qu'un petit nombre de fragments détachés et isolés de matière obscure, plongés dans les cavités de la photosphère, qui cherche à les envahir et à les recouvrir complétement. Ces masses non éclairantes qui forment les noyaux des taches pourraient être appelées des nuages si l'on ne craignait pas de faire naître des équivoques et de susciter des malentendus en confondant la théorie que nous venons d'exposer avec celle des anciens astronomes. Ceux-ci regardaient les taches comme des nuages suspendus au-dessus de la photosphère, ce qui est incompatible avec les découvertes de Wilson et avec tous les travaux des astronomes contemporains. Évitons donc ce mot, ou bien, si nous l'employons quelquefois, rappelons-nous le sens précis qu'il faut y attacher.

4° Les faits que nous avons exposés jusqu'à présent ne nous éclairent pas beaucoup sur l'origine de ces masses obscures; mais, en attendant que des observations d'un autre genre nous permettent d'aller plus loin, nous pouvons affirmer dès maintenant qu'elles doivent être le résultat de crises violentes qui ont lieu dans l'intérieur du globe solaire. Ces crises s'étendent à une grande distance. Quelquefois elles sont soudaines; d'autres fois elles s'accomplissent lentement, leur action se renouvelle de temps en temps, et l'état de trouble, dont elles ne sont que les manifestations extérieures, persévère pendant une longue période.

5° On reconnaît, en effet, dans un grand nombre de circonstances, un mouvement incontestable allant de l'intérieur à l'extérieur, mouvement qui se manifeste par le soulèvement et par la projection de la matière lumineuse sous forme de facule. En général, si l'on étudie avec soin le mouvement des masses lumineuses qui se trouvent dans les taches, on trouve qu'il est comparable à celui d'une matière vaporeuse sus-

pendue dans un milieu transparent. Les courants et les grains de la photosphère sont aspirés vers le centre des taches, où ils vont se dissoudre et cesser d'être lumineux ; ils ne sont pas transparents, comme on le reconnaît lorsqu'ils se croisent. On reconnaît souvent qu'ils sont suspendus à des hauteurs différentes et, à leurs points de croisement, les plus élevés empêchent de voir les autres.

Après cet exposé, on doit réduire à deux les hypothèses relatives à la constitution de la photosphère : 1° on peut admettre qu'elle est composée de flammes proprement dites, c'est-à-dire d'une matière gazeuse incandescente ; 2° on peut la regarder comme composée d'un brouillard lumineux, ou d'une vapeur condensée, suspendue dans une atmosphère gazeuse et transparente. C'est ainsi que sont suspendus dans notre atmosphère les nuages dus à une condensation partielle de la vapeur d'eau ; seulement les nuages lumineux de la photosphère sont composés d'une matière beaucoup moins volatile et dont la température est très-élevée.

Si nous imaginons la photosphère ainsi composée, son aspect extérieur ressemblera, par ses inégalités et ses variations, à celui que présenterait notre atmosphère vue de la Lune. La Terre, entièrement enveloppée de nuages, offrirait à un spectateur placé en dehors d'elle une structure mamelonnée analogue à celle du Soleil, et souvent on observe quelque chose de semblable du sommet des montagnes. Dans beaucoup de circonstances, mais surtout pendant les orages, lorsqu'on se trouve à une hauteur considérable, on voit, comme dans le Soleil, des nuages en forme de *cumuli* s'allonger verticalement ou s'étendre horizontalement, suivant la direction des forces qui agissent sur eux. Souvent même ils subissent une dissolution partielle qui les transforme en *cirri* ou voiles vaporeux, et c'est là ce qui complète l'analogie.

Cette théorie explique, sans qu'il soit nécessaire de recourir à des vitesses fabuleuses, la rapidité avec laquelle s'exécutent certains changements de formes dans les taches. Le déplacement apparent d'un nuage peut s'expliquer sans supposer que la matière qui le compose a réellement parcouru le même espace que le contour du nuage lui-même : il suffit pour cela d'un changement de température produisant d'une part la condensation, d'autre part la dissolution de la vapeur sur une surface très-étendue. C'est ainsi que par un temps calme nous voyons le ciel se couvrir de nuages presque instantanément, ou bien s'éclaircir avec la même rapidité, les courants d'air ayant une vitesse presque nulle et incomparablement plus faible que celle du mouvement apparent des nuages. Un nuage peut, au contraire, paraître immobile malgré un vent violent qui devrait l'emporter et qui emporte réellement avec une grande rapidité la vapeur d'eau qui le compose ; nous en voyons un exemple dans ce qu'on appelle les *nuages parasites* de nos montagnes : l'air traversant une région très-froide, sa vapeur s'y condense pour se vaporiser un peu plus loin, de sorte que le même espace est toujours rempli d'un brouillard qui se renouvelle à mesure qu'il disparaît. De même, de la stabilité de quelques taches on ne serait pas en droit de conclure à l'immobilité de la matière solaire.

Les idées théoriques que nous venons d'exposer s'accordent parfaitement avec les apparences extérieures et avec les phénomènes observés ; mais cet accord pourrait paraître insuffisant, et nous ne voulons pas encore en tirer des conclusions qu'on regarderait peut-être comme prématurées ; nous n'adopterons une solution définitive qu'après avoir exposé les résultats des recherches spectrales.

Quelles que soient les idées qu'on adopte sur la constitution du Soleil, il semble nécessaire, dès maintenant, de regarder

la photosphère comme composée d'un fluide élastique analogue à nos gaz et nous en trouvons une nouvelle preuve dans les mouvements spiraux qui donnent souvent aux taches une grande ressemblance avec nos cyclones. Ces tourbillons sont plus fréquents dans la période de formation ; les mouvements qui les produisent ne tardent pas à se régulariser pour donner naissance à des courants qui convergent vers le centre du noyau.

Tels sont les principaux faits que nous révèle la simple étude optique du Soleil. Ces observations ne nous disent rien sur l'origine des phénomènes que nous avons exposés, de sorte que l'imagination trouve absolument libre le vaste champ des hypothèses ; aussi devons-nous attendre de nouvelles informations qui nous seront fournies par le spectroscope, pour ne pas nous exposer à faire fausse route. Pour le moment, lorsque nous examinons une tache parvenue à sa période de tranquillité, tout ce que nous pouvons dire avec certitude se résume en quelques mots : le noyau est composé d'une masse obscure environnée d'une matière photosphérique à l'état gazeux qui cherche à l'envahir et à la recouvrir. Cette masse noire est-elle solide ou gazeuse ?

Pour nous, la question est tranchée dans le dernier sens ; cependant, respectant des opinions différentes, nous attendrons encore de nouvelles recherches pour persuader nos adversaires.

CHAPITRE V.

MOUVEMENTS GÉNÉRAUX DES TACHES. — ROTATION DU SOLEIL.

§ I. — *Importance et difficultés de la question.*

A la fin du Chapitre précédent, nous avons indiqué plusieurs questions qu'il est impossible de résoudre sans savoir si les taches sont fixes sur le corps solaire ou si elles possèdent un mouvement propre de translation. Il est facile de reconnaître qu'elles ne sont pas absolument fixes, à en juger par leurs transformations et par la manière dont elles se subdivisent en plusieurs parties; mais il s'agit de savoir si, outre ces mouvements accidentels, il n'y aurait pas un mouvement d'ensemble, les entraînant toutes dans une direction constante. Cette translation, si elle existe, se combine avec la rotation du Soleil, et, comme cette rotation ne peut elle-même être étudiée que par le mouvement des taches, on comprend que la question qui nous occupe présente une difficulté toute particulière.

Les premiers observateurs constatèrent des inégalités dans le mouvement des taches, car ils reconnurent bien vite qu'elles ne mettent pas toutes le même temps à décrire une révolution entière. Scheiner trouva que la durée de cette révolution variait de vingt-cinq à vingt-sept et même vingt-huit jours. Galilée, persuadé que les observations de Scheiner étaient mal faites, voulut les reprendre et déterminer d'une manière précise le temps qu'emploie le Soleil à tourner

autour de son axe; mais il ne réussit pas mieux lui-même; il fixa cette durée à un mois lunaire, ce qui est une évaluation bien grossière, et, de plus, il ne reconnut pas l'inclinaison de l'équateur solaire sur l'écliptique.

Pour éliminer l'influence du mouvement propre, on ne peut employer qu'un seul moyen, qui consiste à déterminer la durée de rotation solaire en prenant la moyenne des durées de rotation d'un très-grand nombre de taches. Si l'on n'emploie qu'une seule observation, on commettra évidemment une erreur égale au mouvement propre lui-même; si l'on emploie un très-petit nombre d'observations, il n'y a pas certitude ni même grande probabilité de faire disparaître les erreurs; elles ne se compenseront suffisamment les unes les autres que dans une grande série. Même en employant cette méthode, on ne connaîtra que la rotation moyenne de la surface, et non celle de la masse intérieure; si par hasard il y a une différence, il nous sera impossible de le reconnaître par la seule observation des taches; il faudra pour cela recourir à d'autres procédés.

Au siècle dernier, les géomètres se sont beaucoup occupés de déterminer la rotation solaire d'après trois observations d'une même tache; mais leurs solutions, élégantes et ingénieuses au point de vue géométrique, n'ont pu être d'aucune utilité pour résoudre une question aussi complexe. C'est ce qui a fait dire à Delambre que ce problème est plus curieux qu'utile, et qu'un astronome doit s'en occuper tout au plus une fois dans sa vie, afin de voir si cette rotation demeure constante (*Astronomie*, t. III, p. 59). Heureusement son conseil n'a pas été suivi; dans ces derniers temps, des savants habiles ont repris le problème d'une manière plus rationnelle, et ils sont arrivés à un résultat satisfaisant.

Une des difficultés les plus sérieuses résulte des change-

ments de forme qu'éprouvent les taches; leur contour variant d'un jour à l'autre, on n'est jamais sûr de viser toujours le même point dans les observations successives. On évite en grande partie cet inconvénient en étudiant de préférence des taches rondes, régulières et cratériformes; l'expérience prouve qu'elles varient peu et qu'elles font souvent plusieurs révolutions successives. Cependant, même avec cette précaution, il y a toujours quelques doutes sur ce point, et les résultats sont toujours très-discordants.

Pour se faire une idée de la précision qu'il conviendrait d'apporter dans ces observations, il suffit de rappeler qu'un espace qui, vu au centre du disque, sous-tend pour nous un angle d'une seconde, correspond à un angle héliocentrique de $5'37''$, et cette valeur s'accroît à mesure qu'on s'éloigne du centre, si bien qu'auprès du bord un arc d'une seconde correspond à 3 degrés environ.

§ II. — *Méthodes d'observation.*

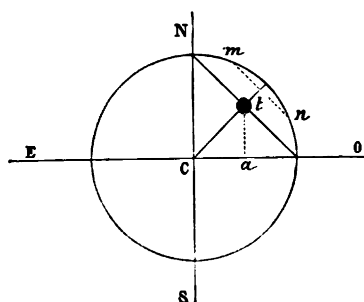
On peut observer les taches, comme les autres corps célestes, avec la lunette méridienne ou bien avec l'équatorial, en déterminant leur position par rapport aux bords du disque. Soient t et t' les époques des passages des deux bords; le passage du centre aura lieu à l'époque $\tau = \frac{t+t'}{2}$; soit θ l'époque du passage de la tache; j'en déduis la différence de son ascension droite qui est $\Delta\alpha = 15(\tau - \theta)\cos\delta$, δ étant la déclinaison du Soleil. On détermine ensuite avec un cercle vertical ou avec un équatorial la distance polaire des bords du disque et de la tache, et l'on en déduit la différence de déclinaison du centre et de la tache elle-même. Cette

méthode est longue, mais il est quelquefois indispensable de l'employer.

En pratique, la meilleure méthode consiste à mesurer directement la distance de la tache au bord du disque, et, en second lieu, l'angle de position, c'est-à-dire l'angle que forme le rayon du disque passant par le point observé avec le cercle horaire qui passe par le centre du disque lui-même.

Soit C le centre du disque (*fig.* 61), C*t* la direction de la

Fig. 61.



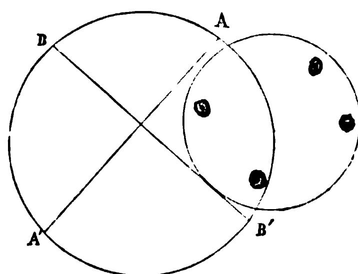
tache, NCS le cercle horaire passant par le centre du Soleil; l'angle de position sera NC*t*. Lorsqu'on connaît cet angle et la distance C*t*, on peut calculer la longitude et la latitude héliographiques de la tache, c'est-à-dire fixer sa position absolue, comme on la verrait du centre du Soleil. Cela se fait par des formules connues ([1]).

Comme il est impossible de prendre exactement la direction du centre, on dispose le micromètre de manière que l'un de ses fils soit perpendiculaire, l'autre tangent au bord; il vaut mieux que le second fil empiète un peu sur le disque, comme on voit en *mn*; on jugera, par l'égalité des deux seg-

([1]) *Voir* la Note I à la fin de ce volume.

ments *m* et *n*, que le réticule est convenablement disposé. On obtient ainsi des résultats excellents; mais il faut convenir que cette méthode est laborieuse, et qu'elle se prête mal à une longue série d'observations. La méthode des projections est préférable, mais elle n'est pas suffisamment exacte et il est nécessaire de faire les corrections que nous avons indiquées dans le Chapitre Ier. On peut les éviter en projetant, comme font M. Spörer et M. Heis, un réseau de traits rectangulaires placé au foyer même de l'objectif : de cette manière les dé-

Fig. 62.



formations sont les mêmes pour l'image du Soleil et pour celle du réticule.

M. Carrington a employé une autre méthode dans sa grande série d'observations. Dans le plan focal de l'objectif, il plaça deux fils d'or, ou, mieux, deux fils d'araignée AA', BB' (*fig.* 62), rectangulaires entre eux et inclinés de 45 degrés sur le cercle horaire; puis il projetait ce réticule sur un écran, et observait les instants où le bord du Soleil et les taches venaient successivement traverser les projections des fils. Ces observations faites, il pouvait calculer facilement la distance au centre du disque et l'angle de position. Cependant, lorsque les taches sont près du bord, cette méthode est difficile à employer, et elle ne donne pas des résultats très-

précis, car une petite erreur dans la détermination du temps en produit une très-grande dans la position.

Dans une série d'observations très-délicates dont nous parlerons bientôt, nous avons employé simplement la méthode micrométrique; mais nous avons trouvé que les dessins exécutés sur les projections, lorsqu'on leur fait subir les corrections convenables, fournissent des données suffisantes pour les calculs ordinaires, et l'on peut parfaitement les employer pour la plupart des recherches qui restent encore à faire.

Quel que soit le moyen qu'on emploie, il faudra toujours combiner un grand nombre d'observations pour rendre les résultats indépendants des causes d'erreur que nous avons signalées, ce qui constitue un travail très-considérable.

Les séries d'observations modernes les plus remarquables sont celles de MM. Carrington et Spörer, et celles qui ont été faites à Kew sous la direction de M. de la Rue. Le grand recueil de M. Carrington porte le titre suivant : *Observations of the spots of the Sun, from november* 9 1853 *to march* 24 1861, *made at Redhill by R. C. Carrington F. R. S., illustrated by* 116 *plates* (Williams and Norgate. London, in-4). Ce grand Ouvrage renferme les résultats des observations, avec les figures et les formules nécessaires pour les calculs.

La série de M. Spörer se continue encore; les *Astronomische Nachrichten* de Altona en publient les résultats à mesure que les réductions sont faites par l'infatigable astronome. Quant à la grande série d'observations photographiques de Kew, elle a été étudiée à d'autres points de vue; mais on n'a pas encore cherché à en déduire les lois de la rotation solaire. De 1858 jusqu'à l'époque actuelle, nous avons dessiné un grand nombre de taches; ces dessins, sans prétendre à la précision que possèdent les photographies, peuvent ce-

pendant fournir d'excellents résultats, et nous puiserons souvent dans notre collection.

Notre pensée n'est pas de rejeter complétement les séries anciennes; nous verrons au contraire qu'on peut les utiliser et qu'elles sont maintenant plus précieuses qu'on ne le pensait autrefois. Les observations récentes sont venues en relever le prix en confirmant leur exactitude.

M. Carrington, après un examen consciencieux de sa grande série d'observations, qui fut en grande partie calculée et imprimée aux frais du Gouvernement anglais, conclut que, pour faire avancer nos connaissances plus qu'il ne l'a fait dans son Ouvrage, il faudrait une dépense d'au moins 5000 livres sterling (125000 francs). Ce point de vue purement financier pourra paraître convenable à un marchand plutôt qu'à un savant; mais il est certain, et nos lecteurs en seront bientôt convaincus, que, vu le travail et l'assiduité qu'elles exigent, les recherches relatives au Soleil ne sauraient être l'œuvre d'un amateur, ni même d'un savant isolé.

§ III. — *Résultats obtenus relativement à la rotation du Soleil.*

La détermination de la rotation solaire renferme trois éléments : 1° la durée de la révolution; 2° la position des nœuds de l'équateur solaire par rapport à la ligne des équinoxes; 3° l'inclinaison de l'équateur solaire sur le plan de l'écliptique.

Les anciens astronomes déterminaient séparément chacun de ces éléments, en choisissant des observations faites dans des circonstances convenables. Pour évaluer la durée de la révolution, on mesurait le temps qu'employait une tache à revenir au même point du disque, par exemple au méri-

dien central. Cette méthode, on le conçoit facilement, n'est applicable que dans un très-petit nombre de cas. On ne peut pas se contenter d'observer le temps qu'une tache met à passer devant le disque, parce que sa trajectoire est partagée en parties inégales par le contour apparent du Soleil, qu'on appelle souvent l'*horizon des taches*. A la suite d'une étude longue et minutieuse, Scheiner put évaluer à vingt-sept jours la durée de la révolution synodique (c'est ainsi qu'on appelle la révolution apparente, dans laquelle la tache revient au même point du disque par rapport à l'observateur). On en déduit vingt-cinq jours et un tiers pour la durée de la révolution sidérale, c'est-à-dire pour le temps employé par un point du Soleil à décrire un cercle tout entier par rapport à la sphère céleste.

On déterminait la position du nœud en observant l'époque à laquelle les taches semblent décrire des lignes droites, l'observateur se trouvant alors dans le plan même dans lequel se meuvent les taches. Scheiner trouva pour sa longitude 69 ou 70 degrés.

Enfin on déduisait l'inclinaison de la grandeur du petit axe de l'ellipse que décrivent les taches à l'époque du maximum de courbure. Scheiner, ayant toujours trouvé ses résultats compris entre 6 et 8 degrés, adopta 7°,5 pour valeur approchée.

Cassini donna des résultats peu différents de ceux de Scheiner, et déduits également d'un grand nombre d'observations. Ces résultats présentent un grand intérêt, et nous les rappelons afin de reconnaître l'étendue des variations que ces éléments ont pu subir. De la Lande a résumé dans deux longs Mémoires (1) les travaux de ses prédécesseurs les plus

(1) De la Lande, *Mémoires de l'Académie royale des Sciences*; 1776, 1778.

estimés. Il détermina les éléments de la rotation avec une précision qu'il croyait très-grande, mais on ne tarda pas à reconnaître que son travail était défectueux. Bianchi reprit le problème en 1820, en employant des méthodes plus exactes et en réunissant un grand nombre d'observations par la méthode des moindres carrés : il lui fut cependant impossible de trouver des résultats satisfaisants. Plusieurs astronomes eurent l'idée malheureuse de n'employer qu'un petit nombre d'observations, et alors les anomalies se manifestèrent d'une manière très-saillante, comme on peut s'en convaincre par le tableau suivant :

ASTRONOMES.	DURÉE de la rotation en jours solaires moyens.	INCLINAISON de l'équateur solaire sur l'écliptique.	LONGITUDE du nœud ascendant.	ÉPOQUES.
Scheiner........	25,33	7°30'	de 69° à 70°	1675
Cassini...............	25,58	7.30	70.10'	1678
De la Lande........ ...	25,42	7.20	78	1776
Delambre........... .	25,01	7.19	80.17	1775
Bianchi...............	25,32	7.14	70.30	1820
Laugier..	25,34	7. 9	75. 8	1840
Petersen	//	6.51	73.29	1841
Böhem..............	25,52	6.57	76.47	1833
Kysæus..............	25,09	6.38	76.38	1841
Carrington..	//	7.15	73.40	1850
Spörer............ ..	25,234	6.57	74.36	1866

Il y a entre tous ces résultats une discordance frappante. M. Carrington la remarqua, et c'est ce qui le détermina à faire une série continue d'observations d'après la méthode que nous avons indiquée.

Avant d'exposer les résultats auxquels il est parvenu, faisons remarquer qu'on ne constate aucune variation considérable dans la longitude du nœud de l'équateur solaire.

Scheiner donnait comme position du nœud ascendant 69 ou 70 degrés, ce qui fait actuellement 72°55′, en tenant compte de la précession des équinoxes. Ce résultat concorde d'une manière suffisante avec celui de M. Carrington, vu le peu de précision des observations anciennes.

Il n'est pas sans intérêt de connaître l'angle que forme, d'après les recherches de Cassini (¹), l'équateur solaire avec les orbites des autres planètes :

	° ′
Mercure..	3.10
Vénus.....................	4. 6
Mars......................	6.50
Jupiter..........	6.22
Saturne...................	5.55

§ IV. — *Résultats trouvés par MM. Carrington et Spörer.*

Le travail de M. Carrington, commencé en novembre 1853, s'est continué jusqu'en mars 1861. Les données de l'observation ont été discutées par une analyse savante et minutieuse qui lui donne une très-grande importance. Dans sa discussion, il prenait comme point de départ la valeur présumée la plus exacte des éléments de la rotation solaire, et il s'en servait pour calculer d'avance les positions que devait successivement occuper une même tache. Il déterminait ensuite les différences entre les positions calculées et les positions observées, et ces différences servaient à calculer les corrections destinées à rectifier les nombres primitivement adoptés. Cette méthode est très laborieuse, mais très-sûre;

(¹) Cassini, *Mémoires de l'Académie royale des Sciences*; 1734.

il y aurait lieu de l'appliquer aux observations anciennes et à celles qui ont été faites depuis le travail de M. Carrington. Nous comparerons les résultats ainsi obtenus avec ceux de M. Spörer d'Anclam, puis avec ceux que M. Zöllner et M. Hornstein ont obtenus par des moyens tout à fait différents. La méthode de réduction de M. Carrington a le grand avantage de mettre en évidence les mouvements propres des taches, en faisant voir la différence qui existe entre les résultats moyens et les observations particulières.

1° La première loi signalée par les observateurs est la confirmation d'un fait déjà remarqué par les anciens : c'est que les taches sont très-rares au delà de 30 degrés de latitude héliocentrique. De la Lande en cite une qui fut observée à 40 degrés. Au mois de juin 1846, M. Peters, à Naples, en observa une autre dont les coordonnées étaient 34°20′ de longitude et 50 degrés de latitude nord. Cette tache est la plus éloignée de l'équateur qu'on ait jamais observée d'une manière certaine, car on regarde comme douteuse celle dont parle Lahire, et qui aurait eu pour latitude 70 degrés nord.

La tache observée par M. Peters possédait un mouvement propre très-prononcé, mais en sens inverse de la rotation solaire; dans ce mouvement elle parcourait chaque jour — 64′ en longitude et + 11′ en latitude.

On a remarqué aussi que les taches sont rares sur l'équateur et qu'elles se montrent en plus grand nombre dans deux zones situées symétriquement, au nord et au sud, entre 10 et 30 degrés de latitude

Les taches ne sont pas également réparties dans les deux hémisphères, de même que leurs limites extrêmes ne sont pas les mêmes de chaque côté de l'équateur; mais il y a compensation dans les longues périodes, et si l'on prend la moyenne pour un grand nombre d'années, on trouvera peu

de différence. Il en est de même pour la latitude à laquelle correspond ce maximum ; elle est variable, mais sa position moyenne est d'environ ± 17 degrés. Enfin M. de la Rue vient de trouver que les maxima semblent passer d'un hémisphère à l'autre et que les lieux où se produisent les grandes taches affectent des positions diamétralement opposées.

2° La seconde loi, plus importante que la première, peut s'énoncer ainsi : *La rotation solaire n'a pas la même durée sur tous les parallèles ; la vitesse angulaire est maximum à l'équateur, et elle diminue à mesure que la latitude augmente : c'est donc à l'équateur que l'arc parcouru en un jour correspond à un plus grand nombre de degrés.* On a cherché à exprimer d'une manière empirique cette rotation diurne. Nous donnons ici trois formules qui sont dues, la première à M. Carrington, la seconde à M. Faye, la troisième à M. Spörer (ξ représente la rotation diurne et λ la latitude) (¹)

$$\xi = 14°25' - 165' \sin^{\frac{7}{4}} \lambda,$$
$$\xi = 14°22' - 186' \sin^2 \lambda,$$
$$\xi = 16°,8475 - 3°,3812 \sin(\lambda + 41°13').$$

Il est donc certain que la vitesse angulaire n'est pas la même sur tous les parallèles. Nous ne connaissons pas la vitesse de rotation près des pôles, et c'est seulement par analogie que nous pouvons généraliser la loi. Au delà du 50ᵉ parallèle, on n'a jamais observé de taches, et par conséquent

(¹) On a encore proposé plusieurs formules, mais elles conduisent toutes aux mêmes résultats. Nous en citerons seulement trois : les deux premières sont des modifications de celle de M. Faye ; la troisième est due à M. Spörer.

$$\xi = 12°,82 + 1°,55 \cos 2\lambda.$$
$$\xi = 12°,982 + 1°,311 \cos 2\lambda.$$
$$\xi = 12°,92 + 13°,74 \cos 2\lambda.$$

on ne peut pas étudier la manière dont s'exécute la rotation pour les régions plus éloignées de l'équateur. Le seul phénomène qui puisse servir de base à cette étude est celui des facules; mais elles sont si variables dans leurs formes qu'on ne peut avoir aucune confiance dans les résultats qu'on obtiendrait par ce procédé. Nous avons étudié les changements que présentent les zones des granulations polaires, aussi bien que les protubérances que nous avons observées près des pôles, mais leur durée n'a jamais été assez considérable pour qu'on puisse leur voir décrire une révolution entière. En mesurant la portion de la circonférence qu'elles ont parcourue et la durée de leur mouvement, nous arriverions à une révolution d'environ vingt-cinq jours, et de plus ces zones seraient très-excentriques par rapport aux pôles.

Pour donner au lecteur une idée des mouvements que possèdent les taches sur chaque parallèle, nous empruntons les deux tableaux suivants à l'Ouvrage de M. Carrington. Le premier (A) résume les travaux relatifs aux mouvements propres, en nous montrant, pour les différentes latitudes où les taches ont été observées, la quantité dont varient en un jour leur longitude et leur latitude. La première colonne indique, pour chaque hémisphère, la latitude solaire moyenne des groupes de taches dont les mouvements sont enregistrés dans les deux colonnes suivantes. La deuxième et la troisième contiennent la moyenne des mouvements diurnes en longitude et en latitude, ces deux coordonnées étant exprimées en minutes de degré solaire. On a supposé que la révolution du Soleil dure $25^{j},380$, et que, par conséquent, l'arc décrit en un jour est de $14°11'$. Les signes + ou — placés devant les longitudes indiquent que le mouvement diurne observé a dépassé ou qu'il n'a pas atteint cette valeur moyenne. Les mêmes signes + ou —, placés devant les latitudes, indiquent

dans chaque hémisphère un accroissement ou une diminution de la latitude, c'est-à-dire un mouvement vers les pôles ou vers l'équateur. La quatrième colonne contient le nombre des taches qui ont fourni les éléments précédents : ce nombre permet de juger l'importance qu'il convient d'attribuer aux différents résultats; il fait également connaître les zones dans lesquelles les taches se rencontrent en plus grand nombre.

TABLEAU A.

Du mouvement propre diurne des taches déduit des observations de Carrington.

LATITUDE NORD.	MOUVEMENT DIURNE en longitude.	MOUVEMENT DIURNE en latitude.	NOMBRE des taches.	LATITUDE SUD.	MOUVEMENT DIURNE en longitude.	MOUVEMENT DIURNE en latitude.	NOMBRE des taches.
+ 50°	— 64'	+ 11'	1	— 45°	— 92'	— 8'	2
″	″	″	″	″	″	″	″
″	″	″	″	″	″	″	″
37	— 66	— 17	2	″	″	″	″
36	″	″	″	36	— 50	+ 6	2
35	″	″	″	35	″	″	″
34	— 43	+ 4	12	34	— 44	— 1	15
33	— 33	+ 7	4	33	— 36	— 10	2
32	— 30	— 2	2	32	— 52	— 5	2
31	— 21	+ 5	15	31	″	″	″
30	— 20	— 1	12	30	— 33	+ 4	12
29	— 36	+ 6	5	29	— 34	+ 1	35
28	— 28	— 8	25	28	— 35	+ 1	18
27	— 27	+ 2	12	27	— 40	+ 0	10
26	— 21	— 1	43	26	— 27	+ 0	17
25	— 12	+ 3	4	25	— 20	+ 3	27
24	— 16	+ 2	23	24	— 23	+ 4	14
23	— 19	+ 1	34	23	— 17	+ 3	7
22	— 12	— 1	33	22	— 14	— 0	72
21	— 14	+ 0	34	21	— 18	+ 5	27
20	— 9	+ 1	31	20	— 12	+ 2	38
19	— 11	— 0	47	19	— 13	+ 1	18
18	— 6	— 1	6	18	— 6	— 0	45
17	— 9	— 1	15	17	— 10	+ 1	32
16	— 5	+ 2	17	16	— 6	+ 0	9
15	— 0	+ 2	41	15	— 10	— 1	27
14	— 4	— 1	30	14	— 4	— 1	28
13	— 2	— 2	24	13	+ 1	0	2
12	+ 16	— 4	18	12	+ 1	— 0	97
11	+ 5	— 0	38	11	+ 6	— 1	18
10	+ 2	— 1	22	10	+ 3	+ 1	22
9	+ 8	— 8	13	9	+ 12	+ 1	43
8	+ 10	— 0	71	8	+ 6	+ 3	38
7	— 8	— 1	53	7	+ 21	+ 0	16
6	+ 11	— 2	19	6	″	″	″
5	+ 31	+ 10	5	5	+ 24	— 12	1
4	+ 15	+ 2	6	4	+ 18	— 4	3
3	+ 38	— 2	2	3	0	— 1	11
2	″	″	″	2	— 17	+ 9	2
1	″	″	″	1	— 4	0	2
0	″	″	″	0	+ 10	— 6	1

TABLEAU B.

LATITUDE des taches.	ROTATION DIURNE en arc.	POIDS, d'après le nombre des observations.	MOUVEMENTS en latitude.
+ 50 N.	787′	1	+ 11.0″
35	806	18	+ 3.5
30	824	59	+ 2.8
25	831	116	+ 1.0
20	840	151	+ 0.2
15	851	127	— 1.0
10	859	142	— 2.4
5	863	85	+ 3.3
Équateur.	867	5	— 1.6
— 5 S.	865	31	+ 1.0
10	856	218	— 0.4
15	845	98	+ 0.8
20	839	200	+ 3.0
25	827	75	+ 1.2
30	814	67	— 5.3
35	805	19	
45	759	2	

Le second tableau est facile à comprendre et résume d'une manière plus claire les résultats du précédent. La première colonne contient les latitudes héliographiques des taches; la seconde montre la manière dont varie la rotation.

M. Faye a comparé cette rotation avec celle qui résulte de la formule de Spörer, et il trouve que les durées de révolution de Carrington sont plus faibles en moyenne de $0^{j},16$ ou de $3^{h}\,8^{m}$. Cette différence est considérable, et l'on ne saurait l'attribuer à des erreurs d'observation. Peut-être cela tient-il à ce que les observations ne se rapportent pas à la même époque, celle de Carrington appartenant à la date moyenne de 1856,7, et celle de Spörer à 1862,5. D'après les dernières recherches de M. Spörer, la valeur de ξ ne serait pas même constante : elle varierait avec le temps d'après une loi qui

n'est pas encore déterminée. Ce fait constitue un des plus singuliers phénomènes de l'histoire du Soleil; on en trouvera peut-être l'explication dans cet autre fait, que les taches se présentent en plus grand nombre à des latitudes qui varient avec le temps. Il y a là une question importante qu'on ne pourra résoudre qu'en appliquant la même méthode de calcul aux deux séries d'observations. Si alors la différence subsistait encore, ce serait un fait d'une portée immense, car il en faudrait conclure que la durée de la rotation solaire varie avec le temps, ce qui ne peut pas avoir lieu dans un corps solide. Dans un corps fluide, cette variation ne serait pas impossible; mais elle supposerait des réactions intérieures bien extraordinaires. Il faut donc attendre de nouvelles observations avant de nous livrer à des spéculations qui actuellement ne reposeraient pas sur un fondement suffisant.

Nous avons voulu examiner jusqu'à quel point les observations anciennes étaient représentées par les éléments de Carrington. Nous avons choisi pour cela un grand nombre d'observations réduites par Lalande dans les *Mémoires de l'Académie des Sciences de Paris*, pour les années 1776 et 1778, et par Bianchi dans la *Correspondance du Baron de Zach*, année 1820; en séparant les taches selon les différents parallèles, nous avons trouvé que ces observations sont représentées avec le même degré de précision que celles de Carrington lui-même.

La durée de rotation fixée par de la Lande, Bianchi, etc., est donc exacte si l'on s'en tient aux latitudes héliographiques des taches qui ont servi à les déterminer.

Ainsi disparaissent les difficultés qui ont tant tourmenté les astronomes relativement à la rotation solaire : *Le Soleil ne tourne pas d'après les lois que devrait présenter le mouvement*

d'un corps solide; d'où résulte que, du moins dans la couche qui est accessible à nos observations, nous devons le regarder comme composé d'une *masse fluide*.

La troisième colonne contient une évaluation numérique de l'importance qu'on peut attacher aux résultats, vu le nombre des taches qui ont servi à les calculer : c'est ce que nous exprimons par le mot *poids*. Cette colonne met en évidence les zones où se produisent les maxima des taches. Si l'on pouvait s'appuyer sur un nombre aussi limité d'années, on pourrait dire qu'il y a quatre zones de maxima correspondant aux latitudes :

$$+20, \quad +10, \quad -10, \quad -20,$$

auxquelles les maxima observés sont

$$151, \quad 142, \quad 218, \quad 200.$$

On peut aisément remarquer que ces positions correspondent à peu près à celles où les mouvements en latitude changent de signe. Cette coïncidence est importante, car elle semble indiquer une relation entre les mouvements en latitude et les arcs qui servent de limites aux différentes zones où se produisent les taches. Nous verrons cependant que cette coïncidence est accidentelle; on ne l'observe que dans la période étudiée par M. Carrington, car les zones changent de position dans les autres séries.

3° On peut encore remarquer que les mouvements en latitude des taches sont également variables, mais la loi n'est pas aussi simple que pour les longitudes. La dernière colonne du tableau précédent, extraite d'un tableau plus détaillé de M. Carrington, montre que la loi est un peu confuse, le nombre des observations étant sans doute insuffisant. Ce-

pendant ce tableau, quelque imparfait qu'il soit, nous permet de faire les remarques suivantes :

a. De 5 à 20 degrés N., et de 10 à 15 degrés S., le mouvement est négatif, c'est-à-dire dirigé vers l'équateur;

b. De 20 à 35 degrés N., et de 15 à 30 degrés S., le mouvement est dirigé vers les pôles : pour les points plus éloignés, il est impossible d'établir une loi; les taches sont trop peu nombreuses et les résultats trop discordants pour qu'on puisse en tirer aucune conclusion.

c. Les changements de signe les plus prononcés correspondent à des points voisins de ceux où le nombre des taches passe par un maximum ou par un minimum; mais on ne voit pas qu'il y ait, comme dans nos ouragans, une tendance nettement prononcée vers les pôles.

d. En comparant les mouvements en longitude et en latitude, on voit que l'équateur ne divise pas les zones des taches et leurs trajectoires en deux parties égales; la ligne de démarcation semble coïncider avec le parallèle de 5 degrés nord. Ce fait est important, et nous le rappellerons dans l'un des Chapitres suivants, lorsque nous reconnaîtrons que l'équateur thermique ne coïncide pas non plus avec l'équateur astronomique et que les protubérances solaires présentent aussi une pareille excentricité.

Les lois que nous venons d'exposer résultent de la discussion des moyennes; mais dans les cas particuliers il y a de très-grandes divergences. Nous avons discuté par manière d'essai les trajectoires de toutes les taches qui ont paru depuis le 1er janvier jusqu'à la fin de juillet 1866; voici les conclusions auxquelles nous sommes arrivé :

Les éléments déterminés par M. Carrington, comparés avec nos observations, laissent à désirer; ils donnent des différences systématiques qui démontrent l'existence de varia-

tions réelles. M. Spörer a combiné nos observations avec les siennes, et elles lui ont donné des résultats que nous inscrivons ci-dessous en regard des éléments donnés par M. Carrington ; tous les nombres sont ramenés à la même époque, 1869 :

ÉLÉMENTS.	CARRINGTON.	SPÖRER.
Nœud	73° 57′	73° 37′
Inclinaison	7° 15′	6° 57′
Rotation diurne	14° 18′	14° 16′
Durée de la rotation	25j,38	25j,2340

Ces deux séries de résultats doivent être regardées comme préférables à toutes celles qu'on a données jusqu'à présent.

Leur différence est assez sensible, mais *elle ne doit pas être attribuée à des défauts dans les observations*. Lorsqu'on les emploie à calculer la position des taches, on trouve toute une série de taches qui diffèrent des positions théoriques par excès, tandis que d'autres en diffèrent par défaut ; on en doit conclure que nous sommes en présence de mouvements réels ; mais, pour démêler ceux-ci, il faudra un travail très-long et très-soutenu. Nous allons exposer les travaux faits à ce sujet.



CHAPITRE V.

MOUVEMENTS PROPRES DES TACHES.

§ I. — *Résultats généraux.*

La recherche du mouvement propre des taches est un travail immense; nous aurions bien voulu nous en occuper, mais, après l'avoir essayé, nous l'avons trouvé au-dessus de nos forces. Nous exposerons cependant les résultats obtenus par nous et par d'autres observateurs.

En examinant un grand nombre de taches observées au micromètre pendant l'année 1866, et calculées avec la plus grande rigueur, nous sommes arrivé aux conclusions suivantes, qui se trouvent également vérifiées dans la grande série de M. Carrington, ainsi que nous l'avons reconnu depuis :

1° Toutes les fois qu'une tache se divise, ou qu'elle subit un changement considérable dans sa forme, on observe toujours un mouvement brusque, une espèce de saut qui se fait invariablement vers la partie antérieure, c'est-à-dire dans le sens où croissent les longitudes.

2° Les grandes taches, même lorsqu'elles ont une longue durée, ne sont pas exemptes de ces mouvements brusques, et l'on remarque de temps en temps des recrudescences d'activité dans la force ou dans le mouvement qui les produit. (Exemple : tache du 14 au 26 mars, du 12 au 23 avril, du 1er au 12 juin, du 28 juin au 9 juillet.)

3° Les taches rondes cratériformes montrent une stabilité plus grande que les taches dont les bords sont déchiquetés, les noyaux multiples et irréguliers; elles font souvent plusieurs rotations.

4° Les taches petites et superficielles ont des mouvements très-irréguliers. Il en est de même des grandes taches, soit à l'époque de leur formation, soit au moment où elles sont sur le point de disparaître.

5° Toutes les fois qu'une tache change de forme, ou qu'il s'en produit une autre dans son voisinage, on remarque une perturbation ou un déplacement.

6° Les grandes taches, après s'être dissoutes, reparaissent souvent à une petite distance de leur position primitive, mais toujours vers la partie précédente. Ainsi la tache n° 43, après avoir disparu, se reproduisit une trentaine de degrés plus loin, sous la même latitude. Ces changements nous empêchent d'affirmer avec certitude que la seconde tache soit réellement due à la même cause qui avait produit la première : il ne faut donc pas avoir une confiance absolue et sans réserve aux coïncidences à longue période signalées par les anciens observateurs.

Pour donner au lecteur une idée de ces mouvements, nous apporterons ici quelques exemples de taches qui ont duré plusieurs rotations, et qui ont été calculées sur des mesures micrométriques faites au grand équatorial du Collége Romain, d'après le système de formules de M. Carrington.

Ces phénomènes montrent qu'il est impossible de ne pas reconnaître aux taches des mouvements propres de transport sur la surface du Soleil.

DATE CIVILE.	JOURS de l'année et fraction.	ANGLE de position.	DISTANCE AU BORD. Côté intérieur.	DISTANCE AU BORD. Côté extérieur.	VALEUR DE ρ.	LATITUDE héliographique λ.	LONGITUDE héliographique A.	NOTES.
Tache n° 32; du 8 au 17 mai 1866. 1er noyau.								
Mai 8	127,9097	69°. 6'	455",70	"	31°.17'.43"	— 3°.48',3	107,24	Irrégulière.
10	129,8819	83.28	698,16	"	15.23.26	7. 9,0	97,73	"
11	130,8923	146. 9	895,53	"	3.22. 4	6.16,3	98,457	Divisée en 2.
12 S.	132,0833	235.34	648,89	"	18.27.17	6.43,9	101,911	"
13	132,8888	240.48	484,20	"	29.16.39	6. 7,9	101,637	"
15	135,1891	243.48	111,239	134",303	60.21.48	5.24,6	102,979	"
16	135,9851	243.15	49,87	"	71. 6.34	6.28,9	103,235	Diam. 2° 59'.
17 S.	137,0694	242.54	1,064	"	87. 1.36	6.47,9	104,725	"
La même. 2e noyau.								
Mai 10	129,8819	77. 5	598,87	"	21.41.31	6.22,2	91,14	"
11	130,8923	87.15	805,06	"	8.49.22	5.51,3	90,882	"
12 S.	132,0833	218.30	816,57	"	8. 6.54	6.50,2	90,582	"
13	132,0833	235. 6	643,30	"	18.48.19	6.52,6	91,253	Trainée de petites taches.

DATE CIVILE.	JOURS de l'année et fraction.	ANGLE de position.	DISTANCE AU BORD.		VALEUR DE ρ.	LATITUDE héliographique λ.	LONGITUDE héliographique A.	DIAMÈTRE apparent héliographique.
			Côté intérieur.	Côté extérieur.				
Tache n° 36. Deuxième rotation de la précédente; du 1er au 12 juin.								
Juin 1	151,9336	79°.52′.48″	32″,231	46″,808	73°.12′.55″	−5°.13′,6	107,673	3°. 5′
2	152,9012	81.16.30	114,378	134,319	59.59. 5	5.41,7	108,193	2.41
3	153,8905	81.46.48	227,828	256,008	47.57.30	4.59,1	107,171	2.32
4	154,8681	84.15.36	402,200	433,433	33.51.20	4.53,9	108,461	2.16
5	155,8876	90.31.12	602,202	632,889	20.17.43	5. 5,8	108,243	1.59
8	158,9048	240.39. 0	595,293	628,777	20.38.27	5.29,9	108,386	2. 9
9	159,8463	248.28.12	416,176	441,078	33. 3.18	4.38,4	108,834	1.47
10	160,9174	250. 0. 6	232,435	250,690	47.55. 5	4.49,8	109,726	1.39
11	161,9004	252.48.12	110,899	124,487	61. 6.32	4.40,9	109,870	1.42
12	162,9033	253.54. 0	26,882	39,249	74.37.35	4.39,6	110,135	0.52
Tache n° 39; du 23 au 26 juin.								
Juin 23	173,8603	243. 4.12	408,452	"	34.28.51	8. 0,3	283,694	"
24	174,8943	249.40.48	231,271	"	48.52.30	8. 9,9	284,828	"
25	175,8751	252.28.12	99,675	114,240	61.19.16	7.35,1	285,600	Irrégulière.
26	176,8800	255. 7.48	22,305	30,652	75. 7.15	7.26,4	286,416	"

DATE CIVILE.	JOURS de l'année et fractions.	ANGLE de position.	DISTANCE AU BORD. Côté intérieur.	DISTANCE AU BORD. Côté extérieur.	VALEUR DE ρ.	LATITUDE hélio-graphique λ.	LONGITUDE hélio-graphique Λ.	DIAMÈTRE héliographique.
No 40. Troisième rotation de la 32e; du 28 juin au 9 juillet.								
Juin 28.........	178,8717	92°.10'.12"	29",447	37",996	74°.25'.31"	—3°.12',2	110,247	1°.56'.19"
29.........	179,9227	94. 9.26	111,486	123,345	60.55.41	5.29,9	109,913	1.39. 7
30.........	180,9003	96.58.48	233,485	245,712	48. 6.51	5.31,0	110,019	1. 6.35
Juillet 1.........	181,9240	101.58.48	397,071	416,333	34.36.33	5.39,9	110,351	1.24.54
2.........	182,8973	110.12.12	572,945	593,282	22.27.27	5.27,4	110,134	1.19.44
4.........	184,8958	213.18. 8	767,38	789,88	10. 8.41	5. 1,6	111,086	1.22.44
5.........	185,8517	245.49.48	604,590	617,747	20.38.11	4.37,3	110,857	0.50.54
6.........	186,8632	255.48.48	420,562	431,110	33.13.18	4.31,9	110,781	0.56.53
7.........	187,8667	260.48. 0	256,212	268,035	46. 6.28	4. 8,2	110,724	1. 2. 0
8.........	188,9280	263.42.12	120,607	128,374	60. 3.18	4. 3,8	110,792	0.57.24
9 S.......	189,8462	665.16.12	41,691	45,205	72.21. 4	4.16,4	111,006	0.43.53
9 M......	190,2472	266.15. 0	28,998	23,619	77.34.39	3.57,5	110,980	1.19.75

DATE CIVILE.	JOURS de l'année et fractions.	ANGLE de position.	DISTANCE AU BORD.		VALEUR DE ρ.	LATITUDE héliographique λ.	LONGITUDE héliographique A.	DIAMÈTRE héliographique.
			Côté intérieur.	Côté extérieur.				
N° 43. Deuxième rotation de la précédente, n° 39; du 11 au 23 juillet.								
Juillet 11.........	191,8981	99°.42'. 0"	9",862	5",569	82°.13'.19"	−7°. 6',8	290,265	1°.31',5
12.........	192,8906	101.24. 0	60,705	52,605	69.48.34	7.17,5	289,748	1.23
13.........	193,8748	104. 5. 1	155,574	141,059	57.16.19	7. 7,2	289,489	1.38
14.........	194,8494	108.18. 4	285,791	266,186	44.55.12	7.24,8	289,418	1.40,5
15.........	195,9250	115.48. 0	470,556	448,836	30.48.56	7.11,8	290,015	1.31,5
16.........	196,8930	128.39. 6	639,422	613,740	19.39.51	6.37,51	289,625	1.39
17.........	197,8924	172.23. 0	750,594	777,789	11. 3.33	6.10,8	290,203	1.41,5
18.........	198,8854	229.30. 0	717,255	686,173	14.55.22	5.56,9	289,868	1.56
19.........	199,8850	251.25. 2	545,553	521,387	25.45.53	5.48,3	289,704	1.37
20.........	200,8790	259.31. 8	372,890	351,785	37.57.31	6. 1,6	289,465	1.38
21.........	201,8651	264.44. 2	221,435	205,119	59.34.54	5.43,2	289,509	1.33,5
22.........	202,8876	267. 6. 0	101,922	90,241	63.44.22	6.22,3	289,308	1.36,5
23 M.......	203,8956	269.55. 2	26,510	21,759	76.56.21	5.54,4	289,411	1.34,5
23 S.......	204,1935	270. 9. 6	14,035	10,217	80.35.22	6.12,4	289,126	1.27

Un simple coup d'œil jeté sur les tableaux précédents nous permettra de faire quelques remarques intéressantes.

La tache n° **32** parut le 8 mai; ses coordonnées étaient 3°48′ de latitude, 107°,24 de longitude. Au bout de deux jours, elle était divisée en deux parties ayant pour coordonnées, l'une 7°9′ de latitude et 97°,73 de longitude, l'autre 6°22′ de latitude et 91°,14 de longitude. La longitude du premier noyau va en augmentant, tandis qu'elle reste stationnaire pour le second; quant aux latitudes, on ne reconnaît pas de mouvement régulier.

Cette tache reparaît le 1er juin (n° **36**); le second noyau a disparu, il ne reste que le premier. La latitude va en diminuant progressivement pendant que la longitude augmente. Au 1er juin, le diamètre était de 3° 5′; le 9, il est réduit à 1°39′. Le 4 juin, il y a évidemment un saut brusque de 1 degré et une grande diminution dans l'étendue.

Nous avons inscrit sous le n° **40** la troisième rotation de la même tache (**32** et **36**). Nous y trouvons une latitude oscillante tandis que la longitude va toujours en croissant. Le diamètre décroît jusqu'au 5 juillet, puis il augmente de nouveau en faisant des mouvements brusques qui annoncent sa dissolution prochaine : en effet, cette tache n'a plus reparu.

Sous les nos **39** et **43** se trouvent deux rotations d'une autre tache. Du 25 au 26 juin sa latitude diminue, tandis que sa longitude va en croissant. Pendant sa seconde rotation, elle possède un mouvement en latitude très-prononcé, tandis que sa longitude est très-stable et son diamètre constant.

Les variations de ce genre ne sont pas des nouveautés : on en retrouve de semblables dans toutes les discussions de taches anciennes. Si nous nous appuyons ici sur nos observations personnelles, c'est pour convaincre le lecteur que les variations signalées par les anciens ne résultent pas d'erreurs

dans leurs mesures, ou de défauts dans leurs instruments comme on l'a cru pendant longtemps. Ces variations sont bien réelles, car nous pouvons garantir et l'exactitude de nos appareils et le soin avec lequel nous avons pris les mesures.

En partant de ces données, on trouve que les déplacements des taches sont très-considérables et qu'ils s'exécutent avec une très-grande rapidité. M. Laugier a trouvé qu'elles doivent parcourir jusqu'à 111 mètres par seconde dans des cas qui ne sont pas très-extraordinaires (1).

Nous ne parlons pas seulement des variations de la longitude; le mouvement en latitude peut aussi être très-considérable et très-rapide. Ainsi Bianchi a observé une tache dont la latitude a pris successivement les valeurs suivantes :

Première révolution........	6°23′
Deuxième révolution	8°22′
Troisième révolution	8°18′
Quatrième révolution.......	10°55′
Cinquième révolution.......	14°57′

Des changements aussi considérables doivent paraître suspects, car il peut arriver qu'on ait affaire à des taches nouvelles. On explique ainsi plusieurs anomalies contenues dans les résultats de Cassini et de la Lande. Cette explication n'est cependant pas toujours suffisante; ainsi il n'est pas rare de remarquer des variations en latitude de deux ou trois degrés dans la demi-rotation qui s'exécute sur l'hémisphère visible du Soleil, et la continuité des observations montre cependant avec certitude que ces différentes positions appartiennent bien à la même tache.

Nous pourrions multiplier ces exemples; mais l'essai que

(1) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XV, p. 492.

nous venons de faire suffira pour montrer au lecteur quelles sont les difficultés que présente la théorie de ces mouvements. Il n'y a peut-être aucune tache dont la révolution représente avec exactitude la rotation solaire; comme nous ne savons pas quelles sont celles qui s'en rapprochent le plus, nous devons nous servir des données les plus disparates : aussi la correction définitive ne peut être que le fruit d'un travail très-long et très-pénible. M. Faye a cependant réussi à trouver quelques règles très-intéressantes. En discutant les observations de Carrington et celles des nôtres qui se rapportent à des taches plus persistantes, il est parvenu aux conclusions suivantes :

Lorsque les taches persistent pendant plusieurs rotations successives, elles présentent, non pas un mouvement progressif, mais des mouvements oscillatoires dont l'amplitude est de plusieurs degrés et dont la durée dépasse de beaucoup celle de la rotation du Soleil; c'est donc une simple oscillation périodique donnant naissance à des courbes sinusoïdales très-allongées.

Les longitudes présentent une oscillation périodique de même durée.

La combinaison de ces deux mouvements fait décrire à la tache, autour de sa position moyenne et dans le sens de la rotation solaire, une ellipse dont le grand axe est dirigé vers les pôles.

Les dimensions de ces ellipses et les durées de révolution varient d'une tache à l'autre, et de plus ces phénomènes ne se manifestent d'une manière évidente que pour les taches qui persistent pendant plusieurs révolutions (1).

Nous regrettons vivement que M. Faye n'ait pas donné

---

(1) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXII, p. 368.

plus d'étendue à ses recherches. Dans les questions de ce genre, on ne peut pas attacher une grande importance à quelques faits particuliers; aucune conclusion ne peut être certaine que si l'on a vu se reproduire un grand nombre de fois le phénomène sur lequel repose le raisonnement.

§ II. — *Conclusions qui résultent des faits précédents et questions diverses.*

Le lecteur aura sans doute remarqué avec surprise le peu de concordance qui existe entre les différents résultats que nous venons d'exposer, et il en aura déjà tiré cette conclusion que nos observations ne portent point sur la partie solide du Soleil, mais seulement sur son atmosphère fluide. En effet, lorsqu'un corps solide est animé d'un mouvement de rotation, il est évident que tous ses points doivent posséder la même vitesse angulaire et qu'ils doivent mettre le même temps à exécuter une révolution entière. Nous avions donc raison de dire, en nous appuyant sur les changements de formes des taches et sur les mouvements dont elles sont le siége, que la couche photosphérique, dans laquelle se passent tous ces phénomènes, est mobile comme les nuages qui flottent dans notre atmosphère.

Plusieurs questions se présentent maintenant à nous : 1° Quelle est l'épaisseur de cette couche mobile? 2° Cette fluidité est-elle particulière à la couche photosphérique, ou bien s'étend-elle au corps solaire tout entier? 3° En d'autres termes, existe-t-il dans l'intérieur du Soleil un noyau solide? 4° Ce noyau n'est-il pas le siége d'actions physiques dont les taches ne seraient que des manifestations? Toutes ces questions sont importantes, mais les astronomes sont loin d'être d'accord sur la solution qu'il convient d'y apporter. Il nous est impossible

de les résoudre dès maintenant : nous exposerons seulement les différentes opinions ; nous les discuterons sommairement, nous réservant de dire, dans une autre partie de cet Ouvrage, quelle est la solution qui nous paraît ressortir de l'examen des faits.

1° Nous avons déjà dit que les anciens astronomes regardaient la profondeur des taches comme mesurant l'épaisseur de la couche photosphérique. Cette opinion pouvait être admise lorsqu'on ne se préoccupait pas de la nature de la chaleur, lorsqu'on pouvait supposer qu'une couche très-mince fût capable de produire, ou plutôt d'émettre, en la *tirant du néant,* l'immense quantité de chaleur que le Soleil perd par le rayonnement. Cette hypothèse est en contradiction formelle avec les idées admises aujourd'hui par les physiciens ; le corps entier du Soleil doit prendre part à cette émission de chaleur, ce qui ne permet plus d'admettre l'existence d'un noyau obscur, solide et d'une température peu élevée, situé à une faible distance de la surface extérieure, comme l'indiquerait la profondeur des taches.

On se rappelle que, d'après les recherches de Carrington, la vitesse de rotation n'est pas la même sur les différents parallèles ; M. Zöllner a voulu expliquer ce fait en partant de l'hypothèse d'un noyau solide recouvert d'une couche fluide peu épaisse exerçant un frottement contre la surface du noyau. Il est arrivé ainsi à la formule suivante :

$$\xi = \frac{A - B \sin^2 \lambda}{\cos \lambda}.$$

A l'aide des observations de Carrington, il a fixé comme il suit la valeur des coefficients :

Pour l'hémisphère nord.....	$A = 863',8$,	$B = 613',2$.
Pour l'hémisphère sud......		$B = 631',1$.

Cette formule ne s'applique pas aux pôles : elle manque donc de continuité, et elle ne représente pas les mouvements observés avec la même exactitude que les formules empiriques; aussi l'hypothèse sur laquelle elle repose ne paraît pas acceptable.

2° De plus, les mouvements propres des taches prouvent que ces phénomènes sont le résultat d'une agitation profonde, qui s'étend à une couche d'une grande épaisseur et remue avec une majestueuse lenteur une masse extrêmement considérable. Il nous est impossible de sonder les profondeurs de la couche fluide qui participe à ce mouvement, mais tout nous montre qu'elle est loin d'être aussi mince qu'on l'a quelquefois supposé.

Nous pouvons donc nous demander si la vitesse angulaire de rotation est la même pour tous les points de la masse solaire; si la vitesse que nous observons à la surface n'est pas absolument différente de celle de l'intérieur; si la couche superficielle que nous étudions n'est pas entraînée, même à l'équateur, par un mouvement général différent de celui qui existe dans les parties voisines du centre. Les arguments directs nous font défaut, puisque les régions intérieures sont cachées à nos regards; mais nous pouvons recourir à une preuve indirecte qui n'est pas sans valeur, quoique, au premier abord, on puisse la trouver un peu singulière.

M. Hornstein, discutant les observations magnétiques de Prague, a trouvé dans le mouvement de l'aiguille aimantée une variation dont la période est de 26^j,33 (1). En s'appuyant sur des raisons que nous apprécierons plus tard, il a attribué cette variation à l'influence magnétique du Soleil; si l'on admet que la durée de cette période est la même que celle de la ro-

---

(1) *Proceedings of the royal Society of London*, vol. XX, p. 21.

tation synodique, on trouve que la rotation vraie s'exécute en $24^j,55$. Le magnétisme nous révélerait donc une durée de rotation très-différente de celle que nous indique l'étude de la surface générale, mais identique à peu près à celle de la région équatoriale.

Si nous nous rappelons la constitution primitive du Soleil, nous trouverons que ce résultat n'a rien que de vraisemblable. On admet que la masse de matière qui compose aujourd'hui le Soleil était autrefois répandue jusqu'aux extrémités de notre système planétaire. En se condensant progressivement, elle a abandonné des anneaux qui ont continué à tourner avec la vitesse qu'ils possédaient alors, vitesse moins considérable pour les plus éloignés et plus grande au contraire pour ceux qui sont plus voisins du centre. Cette condensation, due aux pertes de chaleur que produit le rayonnement, continue encore aujourd'hui, bien qu'elle soit extrêmement lente : il n'est donc pas impossible que la vitesse du noyau soit plus grande que celle des points situés à la surface. Cette différence ne peut pas être très-considérable, car les frottements et les mouvements intérieurs tendent à la diminuer constamment; mais enfin elle peut exister, aucune loi connue ne s'y oppose, puisque nous avons affaire à un corps dont toutes les parties ne sont pas invariablement reliées comme celles des corps solides.

Cette théorie peut, au premier abord, paraître hasardée, mais nous ferons remarquer qu'elle est d'accord avec les faits observés, sans être en opposition avec aucun des principes de la Mécanique. Elle est d'accord avec les faits, car nous avons constaté plus d'une fois qu'il y a un mouvement brusque, un saut en avant, non-seulement dans la période de formation, mais encore aux époques de recrudescence où de nouvelles éruptions viennent modifier la forme des taches. Ce

phénomène s'expliquerait parfaitement en admettant qu'une masse de matière, lancée de l'intérieur du Soleil, arrive à la surface avec son excès de vitesse, et possède, du moins pendant quelque temps, un mouvement relatif dirigé dans le sens où croissent les longitudes.

Nous ajoutons que cette explication n'est en opposition avec aucun des principes de la Mécanique. Il est vrai qu'un illustre savant l'a stigmatisée en la dénonçant comme une hérésie théorique. Cette accusation est grave, et elle emprunte une gravité toute particulière à la haute autorité de M. Bertrand qui l'a formulée (¹). Ce jugement si sévère n'est cependant pas sans appel, et nous espérons convaincre le lecteur que notre pensée a été mal comprise.

Voici les paroles de M. Bertrand : « La molécule poussée de l'intérieur vers la surface y arrivera, dit-il (le P. Secchi), avec son excès de vitesse! Cela est absolument contraire à la vérité. Le principe des aires sera respecté, puisque la force motrice est dirigée suivant le rayon. Or, d'après ce principe, la vitesse angulaire varie en raison inverse du carré de la distance, et la vitesse linéaire, perpendiculaire au rayon, en raison inverse de la distance ; de telle sorte que la différence primitive, que l'auteur explique précisément par l'application du principe des aires à ces molécules qui tournent autour d'un centre, disparaîtra complétement en vertu du même principe, quand ces molécules se trouveront amenées à la même distance du centre. »

La question se trouve donc ramenée à ce point précis : doit-on appliquer le principe des aires au mouvement d'une masse qui, partant des profondeurs du globe solaire, se dirige vers la surface? La réponse doit être affirmative si, comme le sup-

(¹) *Journal des Savants*; juillet 1874, p. 481.

pose M. Bertrand, la force motrice est dirigée suivant le rayon, c'est-à-dire si le mobile est simplement sollicité par l'attraction centrale et soumis aux lois de l'inertie. Il n'en sera pas de même si une nouvelle force intervient, ainsi que nous l'avons bien clairement supposé (¹); dans ce cas, la loi des aires cesse de s'appliquer ou du moins elle ne s'applique plus de la même manière, et les molécules venant de l'intérieur à la surface peuvent apporter avec elles leur excès de vitesse : nous allons le montrer par un exemple bien simple.

On sait qu'un corps tombant d'une grande hauteur ne suit pas exactement la verticale : il est dévié vers l'est; de même un projectile lancé verticalement de bas en haut, avec une vitesse considérable, ne suivra pas exactement la verticale : il sera dévié vers l'ouest dans son mouvement ascensionnel. Cela tient à ce que les différents points d'une même verticale ayant la même vitesse angulaire possèdent une vitesse linéaire proportionnelle au rayon du cercle qu'ils décrivent. Mais on peut supposer que les différentes parties d'une masse tournant sur elle-même ne sont pas invariablement reliées entre elles; dans ce cas, la vitesse angulaire pourra varier d'un point à un autre d'une manière quelconque. Supposons qu'en deux points situés sur la même verticale la vitesse linéaire suivant la perpendiculaire au rayon soit la même : ces deux points n'ayant pas la même vitesse angulaire ne resteront qu'un instant sur la même verticale; mais si, à cet instant, un mobile est lancé de l'un de ces points vers l'autre, il y parviendra réellement, sans éprouver de déviation ni en avant ni en arrière Si enfin la vitesse linéaire était plus grande au point le plus bas, un mobile lancé de bas en haut arriverait en éprouvant, par rapport aux molécules situées sur son passage, une déviation

(¹) *Le Soleil*, 1re édit., p. 104 et 105.

dans le sens du mouvement. C'est précisément l'hypothèse que nous avons proposée pour expliquer un phénomène observé par nous dans le mouvement des taches. Nous avons supposé une rotation plus rapide à l'intérieur du globe solaire qu'à la surface; puis, sans prétendre assigner les causes qui seraient capables de produire ce mouvement, nous avons admis qu'une *force quelconque* peut amener vers la surface une masse de matière partie de l'intérieur du Soleil. Ces hypothèses peuvent être arbitraires, selon l'expression de M. Bertrand, mais elles ne contiennent aucune hérésie théorique.

3° Mais laissons de côté cette digression; pour le moment, nous voyons que la discussion ne doit porter que sur un seul point : *Le noyau du globe solaire est-il liquide ou gazeux?* Si l'on ne considérait que la température, on n'hésiterait pas à se prononcer pour la fluidité gazeuse; mais il faut aussi tenir compte de la pesanteur et de la pression qui en est la conséquence; aussi les données que nous avons exposées jusqu'à présent ne suffisent pas pour résoudre la question : il faut attendre que nous ayons fait connaître des faits plus décisifs. Comme nous avons hasardé le premier l'hypothèse de l'état gazeux du Soleil ([1]), nous nous bornerons à dire que, sous la pression énorme qui doit exister dans l'intérieur de cet astre, la constitution des gaz peut être très-différente de celle que possèdent ces mêmes corps aux faibles pressions sous lesquelles nous les étudions. On sait maintenant que les corps ne passent pas brusquement de l'état gazeux à l'état liquide; il y a un état intermédiaire étudié jadis par Cagniard-Latour, et plus récemment par Andrews. Le Soleil, quoique gazeux à la surface et très-dense au centre,

---

([1]) *Bullettino meteorologico dell' Osservatorio del Collegio Romano*, 1 genn. 1864, p. 4.

pourrait donc, à partir d'une certaine profondeur, avoir une semblable constitution, et l'on pourrait voir une confirmation de cette idée dans la faible densité moyenne qu'il possède (1,45), malgré l'énorme pression qui tend à le comprimer. De plus, on sait que, dans cet état, de faibles variations dans la pression peuvent produire de grandes variations de volume : n'y aurait-il pas là un moyen d'expliquer les violentes éruptions qu'on observe souvent?

On a objecté que, si le Soleil était gazeux, il serait transparent; il serait donc impossible d'expliquer l'existence des taches et la netteté avec laquelle se trouve limité son contour. Cette objection prouve tout au plus que la photosphère n'est pas dans un état parfaitement gazeux, mais qu'elle est composée, comme l'admettait Wilson, de matière précipitée en suspension dans un gaz, ou bien qu'elle se trouve dans un état de transition, comme nous le disions tout à l'heure. Dans l'une comme dans l'autre de ces hypothèses, le Soleil conserverait la mobilité qui caractérise les gaz sans en avoir la transparence.

Si cependant on veut admettre que la photosphère est composée de gaz enflammés, nous répondrons : 1° que ces flammes, quoique gazeuses, ne s'étendent pas au delà d'une certaine limite; 2° que les vapeurs, sous une épaisseur considérable, sont loin d'être transparentes comme le sont les gaz parfaits, l'oxygène, l'hydrogène, etc. Nous verrons que l'hydrogène lui-même cesse d'avoir une transparence parfaite sous une grande épaisseur. A plus forte raison les vapeurs métalliques ne se laissent pas parfaitement traverser par la lumière, sans quoi elles ne seraient pas visibles. Or on sait qu'elles sont visibles, soit directement par les rayons qu'elles émettent, soit indirectement par l'absorption qu'elles font éprouver à la lumière qui les traverse. L'atmosphère qui

entoure notre globe, malgré son état parfaitement gazeux, ne jouit pas d'une transparence parfaite. Quant à l'atmosphère qui enveloppe le Soleil, elle est si peu transparente que, au centre du disque, elle absorbe au moins la moitié des rayons lumineux émis par la photosphère. On a beaucoup exagéré la parfaite transparence des gaz incandescents : le carbone acquiert dans nos flammes une transparence presque absolue, et cependant M. Hirn a prouvé que la lumière, en traversant un petit nombre de flammes plates, perd jusqu'à 8,6 pour 100 de son intensité (¹). Les vapeurs métalliques qui composent le Soleil doivent posséder un pouvoir absorbant beaucoup plus considérable.

4° La quatrième question est plus complexe, et nous y reviendrons plus tard, lorsque nous aurons complétement étudié les lois qui régissent la rotation du Soleil.

§ III. — *Recherches théoriques sur la rotation du Soleil.*

Les recherches de Carrington ont montré que la vitesse de la rotation solaire n'est pas la même à toutes les latitudes, résultat confirmé par l'étude des observations anciennes. Les physiciens se sont occupés de rechercher l'explication de ce fait extraordinaire. Nous avons déjà parlé des essais de M. Zöllner, essais qui n'ont pas été couronnés d'un succès satisfaisant. D'autres savants, partant également de l'hypothèse d'un noyau solide, ont comparé les mouvements de la

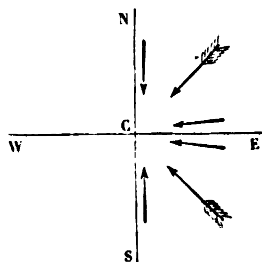
---

(¹) *Annales de Chimie et de Physique*, 4ᵉ série, t. XXX; 1873. M. Hirn admet, dans ce Mémoire, que les particules incandescentes en suspension dans la flamme deviennent réellement transparentes; et, en effet, certains métaux en fusion, comme le fer, le cuivre, etc., sont réellement translucides.

photosphère à celui de nos vents alizés : nous devons discuter cette hypothèse.

Les marins et les météorologistes savent parfaitement qu'il existe dans la zone torride des courants atmosphériques soufflant constamment du nord-est dans l'hémisphère nord, du sud-est dans l'hémisphère sud. Ces courants résultent du mouvement de rotation de la Terre combiné avec la force d'appel qu'exerce la chaleur du Soleil en échauffant les régions équatoriales et en déterminant par là un mouvement de bas

Fig. 63.



en haut. Un vide tendant ainsi à se former dans la zone torride, l'air des régions voisines se précipite pour le remplir. Dans ce mouvement, l'air passe d'un parallèle de rayon plus petit à un parallèle de rayon plus grand : de là une différence de vitesse qui produit l'effet d'un vent soufflant de l'est; enfin, ce courant se combinant avec le mouvement de translation de l'air lui-même des pôles vers l'équateur, il en résulte des vents composés et inclinés par rapport à l'équateur, comme nous l'avons indiqué plus haut. Soient NS le méridien (*fig.* 63), EW l'équateur. L'appel d'air causé par la chaleur solaire produit deux courants opposés, NC et SC, dirigés des pôles à l'équateur. Les molécules qui arrivent des régions polaires sont animées, sur le parallèle de départ,

d'une vitesse moindre que celle du point d'arrivée. Si donc nous considérons un spectateur placé au point C, il se porte au-devant des molécules qui arrivent de part et d'autre avec une vitesse plus faible que la sienne : il en résulte donc le même choc que si, lui étant immobile, elles venaient à sa rencontre avec une vitesse égale à la différence des deux autres. De là un vent d'est qui, combiné avec les courants polaires, devient nord-est dans l'hémisphère boréal, sud-est dans l'hémisphère austral.

Ces courants inférieurs sont accompagnés de courants supérieurs d'une élévation de 2000 à 3000 mètres, soufflant du sud-ouest dans notre hémisphère, du nord-ouest dans l'hémisphère sud. De plus, au delà du 30e degré de latitude, il existe des zones de calme dans lesquelles l'air descend, se divise en deux parties dont l'une se dirige de nouveau vers l'équateur, tandis que l'autre va en sens contraire et sert à alimenter les courants polaires.

Telle est, en peu de mots, la nature de cette grande circulation terrestre dont on a cru reconnaître l'existence dans l'atmosphère solaire. Cette théorie n'a rien d'impossible en elle-même. On pourrait bien objecter que le Soleil n'est pas, comme la Terre, soumis à l'action d'une force extérieure capable de déterminer ces mouvements en échauffant de préférence les régions équatoriales; mais il n'est pas impossible que le même effet soit produit par une cause tout intérieure, et, de fait, nous verrons que la température est plus élevée à l'équateur qu'aux pôles.

Mais, au lieu de chercher s'il existe des causes capables de produire une circulation analogue à celle des vents alizés, suivons une méthode plus positive, et voyons si les faits se prêtent à ce mode d'interprétation. Dans ce mouvement atmosphérique, les taches se trouveraient dans le courant in-

férieur, ou dans le courant supérieur. Dans la première hypothèse, partant d'un parallèle où la vitesse est moins considérable, elles arriveraient à l'équateur avec un mouvement relatif dirigé en sens contraire de la rotation générale. En effet, une tache, possédant la vitesse propre d'un parallèle plus élevé, lorsqu'elle se trouve transportée à l'équateur, ne décrira plus dans le même temps un arc d'un même nombre de degrés. Sa vitesse angulaire paraîtra donc plus faible, et par suite les taches, dans le voisinage de l'équateur, paraîtront marcher plus lentement qu'aux latitudes élevées. Or cette conclusion, inévitable dans la théorie des vents alizés, est en contradiction formelle avec les faits observés.

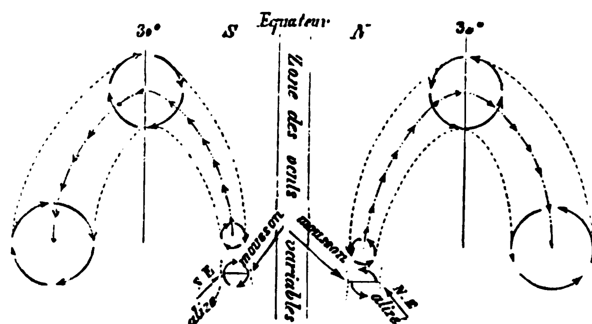
Voyons si nous réussirons mieux avec le courant supérieur qui va de l'équateur aux pôles. Une tache partant des régions voisines de l'équateur emporte avec elle une vitesse plus grande que celle des parallèles qu'elle va parcourir : elle doit donc, à mesure qu'elle s'éloigne, se trouver en avance sur le mouvement des régions où elle arrive; et, par conséquent, si nous supposons les taches situées dans le courant supérieur, elles marcheront plus vite sur les parallèles plus éloignés de la zone équatoriale, résultat qui est, aussi bien que le précédent, inconciliable avec les faits observés.

De quelque manière que nous essayions d'appliquer au Soleil la théorie des vents alizés, nous arrivons à un résultat contraire à la loi bien établie du mouvement des taches en longitude, puisque c'est à l'équateur qu'elles possèdent la plus grande vitesse.

Nous n'avons tenu compte, dans cette discussion, que du mouvement en longitude; mais, en outre, les taches possèdent aussi un mouvement en latitude dont l'existence ne saurait être contestée, quoiqu'il ne soit ni aussi régulier, ni aussi bien étudié. Les observations de Carrington ont mis en évi-

dence des lignes nodales et des changements de signe qui indiquent un transport des taches vers l'équateur solaire entre les latitudes 25 degrés nord et 20 degrés sud. Au delà de ces limites, le mouvement devient divergent et les taches se dirigent vers les pôles. Si ces mouvements étaient constants et réguliers, ils seraient réellement comparables à ceux qu'on observe dans les alizés terrestres; mais, outre leur peu de précision et de généralité, les recherches déjà citées de M. Faye prouvent que le transport de l'équateur vers les pôles n'est

Fig. 64.



pas constant. Si nous ajoutons cette remarque à la discussion que nous venons de faire du mouvement en longitude, nous voyons qu'il devient impossible d'appliquer au Soleil la théorie des alizés.

Même sur la Terre, il ne faut pas confondre le mouvement des alizés avec celui des ouragans ou des cyclones. L'observation prouve que ceux-ci ont un mouvement à peu près perpendiculaire à la direction générale des alizés : la *fig.* 64, que nous empruntons aux travaux de Piddington, met en évidence les deux phénomèmes : les flèches droites donnent la direction des alizés et les arcs paraboliques représentent le mouvement de translation des ouragans. La zone où naissent

ces météores est celle où se réunissent les impulsions contraires des moussons et des alizés. On voit qu'un observateur. qui de loin regarderait la Terre, la verrait tourner plus lentement aux points qui correspondent aux cyclones. S'il en est de même dans l'atmosphère solaire, le mouvement des taches peut être très-différent de celui de la masse gazeuse qui les environne; elles auraient ainsi une vitesse plus grande à l'équateur, plus faible sur les parallèles : dans ce cas elles pourraient être assimilées à nos cyclones. Cette opinion, émise depuis longtemps, est soutenue depuis quelques années par M. Faye, qui regarde toutes les taches comme des tourbillons.

Cette théorie, admise dans une certaine mesure, peut expliquer un grand nombre de faits; mais elle ne nous paraît pas avoir la généralité que lui attribue M. Faye. Nous n'avons jamais nié l'existence des taches tournantes : nous avons même constaté plus d'une fois que certaines taches affectent la forme spirale. De plus, on en voit souvent qui obéissent à la loi de circulation des cyclones : elles tournent *dextrorsum*, c'est-à-dire comme les aiguilles d'une montre, dans l'hémisphère austral, et *sinistrorsum* dans l'hémisphère boréal; mais nous avons déjà fait remarquer que le nombre de ces taches est très-petit relativement à celles qui ne présentent rien de semblable. De plus, dans ces derniers temps, nous avons étudié plusieurs taches en déterminant jour par jour la position des ponts et des langues : ces mesures nous ont appris que le mouvement tourbillonnant change souvent de direction; il est donc impossible d'attribuer ce phénomène à une cause persistante comme celle qui produit nos cyclones. De là naît une difficulté sérieuse qui, jointe à l'absence de transport systématique de l'équateur vers les pôles, ne permet pas de comparer les taches aux cyclones terrestres.

Il doit cependant y avoir un mouvement de rotation dans toutes les taches. Nous avons vu que la matière lumineuse se précipite de toutes parts vers le noyau. Cet afflux de molécules provenant de parallèles où les vitesses sont différentes doit produire un mouvement tourbillonnant, comme il arrive dans notre atmosphère même pour les orages ordinaires. Mais, comme la rapidité avec laquelle tourne un tourbillon dépend principalement de la vitesse avec laquelle la matière se porte vers le centre, si cette vitesse est faible, le mouvement gyratoire sera peu rapide ; le frottement pourra même le rendre insensible en ralentissant le mouvement centripète. Si une tache était une région *vide* ou considérablement raréfiée, cette vitesse serait très-grande ; mais si elle est remplie de matière, si elle ne diffère des régions voisines que parce qu'elle contient une masse un peu plus froide et plus absorbante, la vitesse du mouvement centripète sera assez faible pour que la rotation qui peut en résulter soit insensible. D'ailleurs, si les taches sont des centres d'éruption, il peut s'y produire une force centrifuge capable de détruire l'effet de la force centripète, ou même de produire un effet contraire ; or il est incontestable que la production des taches est intimement liée avec les phénomènes d'éruption.

Nous avons déjà fait remarquer que, au moment de disparaître, les ouragans terrestres et les taches solaires se comportent de manières absolument différentes ; les ouragans se dilatent, les taches se contractent ; les ouragans se dirigent vers les pôles en rebroussant chemin dans leur mouvement en longitude, les taches suivent une tout autre direction, et leur mouvement rotatoire n'est considérable que dans la première phase de leur formation, lorsque l'éruption est plus violente.

Enfin, si nous admettons que les taches peuvent être com-

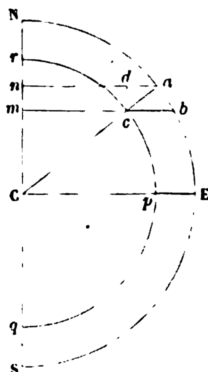
parées à nos ouragans, il faudra, pour les expliquer, trouver une cause capable de déterminer ces crises. Il ne suffit pas d'invoquer le mouvement de rotation du Soleil, ni le transport de la couche mobile, soit dans un sens, soit dans l'autre. Ces causes sont constantes et permanentes, tandis que les taches sont des phénomènes intermittents et variables. Leurs causes doivent être de même ordre que celles qui déterminent la production des ouragans terrestres, causes qui nous paraissent irrégulières et accidentelles, parce que nous n'en connaissons point l'origine. On a dit que chaque pore qui se produit sur le Soleil est un véritable tourbillon, et qu'ainsi ces tourbillons recouvrent littéralement la surface du globe solaire : il n'y a là qu'une hypothèse sans aucun fondement dans l'observation; nous avons étudié ces pores avec soin et persévérance sans y rien découvrir qui puisse faire soupçonner l'existence de ce prétendu mouvement tourbillonnant. Quant à la cause déterminante de ces phénomènes, nous la trouverons dans les éruptions solaires que nous étudierons plus tard; nous verrons que la théorie des tourbillons et celle des éruptions, loin de se contredire, se complètent l'une l'autre.

Pour le moment, bornons-nous à constater que les taches paraissent douées d'un mouvement de translation générale contraire au mouvement qui entraîne la masse entière du Soleil. Nous sommes amené à cette conclusion par des faits de différentes natures : 1° la discussion des observations magnétiques de M. Hornstein; 2° la présence, à la partie postérieure des taches, de queues plus ou moins agitées, semées de facules et de petites taches ; 3° la disposition des facules qui sont plus vives et plus étroites à la partie antérieure des taches, tandis qu'elles sont nombreuses, plus larges, mais plus pâles à la partie postérieure qui présente elle-même sur

son contour un renflement que M. de la Rue appelle un bourrelet. Tous ces faits conspirent pour nous faire voir à la surface une circulation générale différente du mouvement qui anime la masse intérieure.

Il nous est impossible de formuler une théorie expliquant d'une manière absolument satisfaisante cette circulation exceptionnelle de la masse solaire; nous allons cependant pro-

Fig. 65.



poser une hypothèse que nous soumettons au jugement des savants compétents.

Le Soleil se refroidit d'une manière progressive en perdant de la chaleur par le rayonnement; nous verrons plus tard comment on peut évaluer ces variations. Cet abaissement de température produit nécessairement une diminution de volume dont nous allons examiner les conséquences.

Supposons un globe NES (*fig.* 65); par suite du refroidissement, la surface NES prend au bout d'un certain temps la position *rpq*, le point E étant descendu en *p*, le point *a* en *c*, etc. Dans ce mouvement de contraction, les différents points se rapprochent inégalement de l'axe de rotation NS : le point E

s'en rapproche de la quantité Ep, tandis que le point a s'en est rapproché seulement de la quantité

$$ad = ac \cos cad = Ep \cos \lambda,$$

λ étant la latitude du point a. On voit donc que *le rayon du cercle décrit par un point quelconque se raccourcit d'une quantité proportionnelle au cosinus de la latitude; ce raccourcissement est maximum à l'équateur, et il diminue progressivement jusqu'au pôle où il est nul.*

Supposons donc un globe tournant autour d'un de ses diamètres et dont toutes les parties sont soumises à la gravitation; le rayon venant à diminuer, il en résultera, en vertu de la loi des aires, un accroissement de vitesse angulaire dépendant du carré de cette même diminution : la vitesse s'accroîtra donc à l'équateur plus qu'en tout autre point, et sur un parallèle de latitude λ, cet accroissement pourra être regardé comme proportionnel à $\cos^2\lambda$.

Ce résultat serait l'une des formes sous lesquelles peut se présenter la loi de Carrington, et l'excès de vitesse des régions équatoriales serait une conséquence du refroidissement. M. Roche est arrivé à la même conclusion en considérant seulement la condensation progressive de la masse nébuleuse qui a formé le Soleil, et il admet que l'accélération actuelle résulte de cette action primitive; il est évident que, grâce au frottement, cette accélération devrait disparaître avec le temps; mais, comme la contraction due au refroidissement se produit d'une manière permanente, l'accélération équatoriale qui en résulte doit également persévérer.

Cette diminution de volume du Soleil peut être très-faible, assez faible pour qu'il soit impossible de la constater dans un intervalle de temps aussi court que celui qui s'est écoulé depuis l'époque où l'on a commencé à faire des mesures pré-

cises ; et cependant, vu l'immensité du globe solaire, elle peut être suffisante pour expliquer les différences de vitesses qui nous ont été révélées par l'observation.

§ IV. — *De quelques irrégularités apparentes dans le mouvement des taches.*

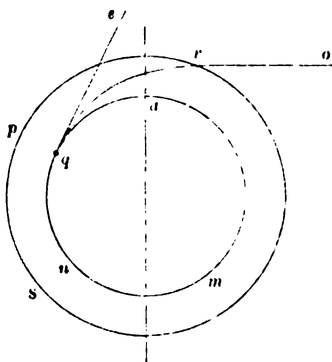
Lorsque l'on étudie les mouvements en longitude d'une tache, on trouve, comme nous l'avons dit, des variations très-considérables et qui paraissent tout à fait anomales. Mais en dehors de ces mouvements irréguliers, on constate, auprès des bords, des aberrations systématiques dont on peut saisir les lois : près du bord oriental, la tache paraît se rapprocher du centre, sa longitude augmente, et, près du bord occidental, elle paraît marcher en sens contraire et s'approcher encore du centre pendant que sa longitude diminue. Ainsi donc, dans la partie orientale du disque, les arcs diurnes se trouvent augmentés, tandis qu'ils sont diminués dans la partie occidentale.

Après avoir remarqué ce fait en examinant les tableaux de M. Carrington, nous en cherchâmes la cause, et nous fûmes porté à l'attribuer à la réfraction de l'atmosphère solaire. Déjà M. Carrington avait indiqué cette source d'irrégularité, mais il ne l'avait pas étudiée avec le soin qu'elle mérite.

Soient *amn* (*fig.* 66) le globe solaire; *rp*S la couche atmosphérique dont il est couvert. Si cette couche possède un pouvoir réfringent assez considérable, un rayon émané du point *q*, au lieu de suivre la direction *qe* suivant laquelle il se propagerait dans le vide, sera dévié suivant une courbe, telle que *qro* tangente à la droite *qe*. Ce rayon ainsi dévié pourra parvenir à l'œil d'un observateur placé en *o*, pour lequel le point *q* fût resté invisible sans la réfraction. Un point

quelconque deviendra donc visible pour nous un peu avant de franchir le cercle qui forme le contour géométrique du Soleil, et qui, sans la réfraction, séparerait la partie visible de la partie invisible; les taches seront donc visibles un peu plus tôt d'un côté du disque, tandis que de l'autre elles disparaîtront un peu plus tard. On pourra, pour le calcul relatif à ces phénomènes, employer les formules qui servent à éva-

Fig. 66.



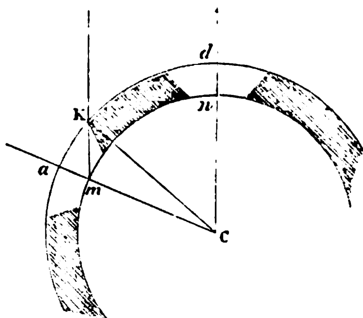
luer l'influence de nos réfractions atmosphériques sur le lever et le coucher des astres.

Pendant que nous examinions l'influence des réfractions dues à l'atmosphère, M. Faye donnait une autre explication des irrégularités systématiques qui se produisent près des bords du disque. D'après lui, ces anomalies seraient produites par un phénomène qu'il a appelé la *parallaxe de profondeur*, et qui résulte en effet de ce que les taches sont des cavités.

Supposons (*fig.* 67) une tache ayant la forme d'une cavité conique. L'observateur vise le centre *n* du noyau, et dans ses évaluations il le rapporte au point *d* où son rayon visuel rencontre la surface de la photosphère. Si la tache occupe le

milieu du disque, le rayon visuel *dn* passant par le centre C du Soleil, le point visé se projettera au centre même de la pénombre. Mais si la tache se trouve auprès du bord, le point *m* visé par l'observateur suivant la direction K*m*, au lieu d'être rapporté à l'extrémité *a* du rayon solaire C*ma*, paraîtra projeté au point K où le rayon visuel rencontre la photosphère; la tache paraîtra donc s'être rapprochée du centre de la quantité *a*K. Quand on cherche à calculer l'influence de cette pa-

Fig. 67.



rallaxe, on trouve qu'elle produit une erreur proportionnelle à la tangente de la distance héliocentrique de la tache, et exprimée par la même formule trigonométrique qui sert pour les réfractions. Il devenait donc impossible de déterminer, par le simple résultat numérique des formules, la part qui revient à chacune de ces deux causes dans la production des mouvements apparents qui nous occupent. Le doute était d'autant plus permis que les calculs faits par M. Faye, en partant de son hypothèse, attribuaient aux taches une profondeur bien plus considérable que celle qui résulte des mesures directes, car il leur assignait un rayon terrestre pendant que l'observation directe donne à peine un tiers.

L'observation pouvait seule résoudre la question, en four-

nissant des données nouvelles. Pour cela, il fallait chercher à se soustraire à l'une des deux causes d'erreur, afin de pouvoir évaluer l'influence de l'autre. Il était évidemment impossible d'éviter la réfraction ; mais je pensai qu'il serait possible d'éliminer la parallaxe de profondeur en prenant la position des deux bords de la tache, et en calculant séparément leurs coordonnées héliographiques. J'eus le bonheur, en 1866, de rencontrer quelques taches très-régulières et ayant un faible mouvement en longitude, surtout celle du 16 juin au 9 juillet, et celle du 11 au 23 juillet. Je les suivis jour par jour avec beaucoup de soin, prenant des mesures micrométriques avec le grand réfracteur, et j'obtins les résultats inscrits dans des tableaux dont sont extraits ceux du paragraphe précédent.

Après avoir ainsi évité les erreurs dues à la parallaxe de profondeur, on trouve encore une perturbation dans la marche en longitude, et ces perturbations, qui sont toutes dans le sens indiqué par la théorie, ne peuvent être attribuées qu'à la réfraction. Cependant leur valeur ne dépasse pas de beaucoup la limite des erreurs d'observation. Nous sommes convaincu que la réfraction solaire existe; mais nous ne pourrons l'évaluer qu'après avoir fait de nombreuses observations sur des taches d'une régularité et d'une stabilité extraordinaires (1).

Ce sont ces mesures, prises avec le plus grand soin, qui nous ont appris que les taches subissent souvent de très-grands changements dans leurs dimensions réelles, et que tout changement de forme un peu considérable entraîne une irrégularité dans la marche en longitude.

(1) *Voir* les *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, 1866, t. LXIII. p. 163-170.

La théorie de M. Faye, sur la parallaxe de profondeur, se trouve ainsi parfaitement vérifiée, et à son tour elle sert de confirmation aux idées de Wilson. Les taches sont donc des cavités; mais ces cavités sont-elles produites par des éruptions volcaniques, ou bien sont-elles dues à des tourbillons analogues à nos cyclones? Nous traiterons cette question lorsque nous aurons recueilli toutes les données nécessaires pour la résoudre. Une circonstance nous porterait dès à présent à adopter l'assimilation avec les cyclones : c'est que le maximum des taches coïncide avec les limites des zones où se produit le renversement du mouvement en latitude; mais ne nous hâtons pas de tirer des conclusions qui pourraient être prématurées.

§ V. — *Résumé des mouvements des taches.*

On voit, par tout ce que nous avons dit jusqu'ici, qu'au lieu d'observer le mouvement de rotation du corps solaire lui-même, nous en sommes réduit à étudier celui de son atmosphère. Nous sommes donc dans les conditions où se trouverait un astronome qui voudrait, en se plaçant dans la Lune, déterminer le mouvement de rotation de la Terre, en prenant un nuage pour point de repère. Il lui faudrait d'abord étudier la circulation atmosphérique et en déterminer les lois, tâche bien difficile, et à peu près impossible dans de pareilles circonstances.

Les connaissances que nous avons acquises nous permettent cependant de diviser les mouvements des taches en trois catégories :

La première comprend tous les mouvements généraux, et à ce point de vue le résultat le plus important est l'inégalité des rotations sur les divers parallèles; la vitesse angulaire est

maximum à l'équateur, et elle diminue lorsque la latitude augmente.

La deuxième catégorie comprend les mouvements apparents dus à la parallaxe de profondeur et à la réfraction. La première de ces deux causes étant éliminée par la méthode d'observation que nous avons proposée, il reste seulement la seconde, dont l'influence n'a pas encore été suffisamment déterminée, mais qui n'est pas à négliger.

La troisième contient tous les mouvements irréguliers et extraordinaires qui dépendent des causes mêmes qui produisent les taches, causes encore bien obscures et qui resteront longtemps inconnues.

Nous avons fait remarquer plusieurs fois que ces mouvements se produisent surtout au moment de l'apparition d'une tache; il se forme souvent plusieurs centres sans qu'on puisse prévoir lequel d'entre eux persévérera et formera définitivement le noyau de la tache. Les mêmes irrégularités se renouvellent à l'époque de la dissolution finale; aussi les taches les plus stables sont celles qui paraissent les plus profondes.

Enfin il est impossible d'expliquer les mouvements systématiques des taches par des courants analogues à nos vents alizés. Cette hypothèse n'explique pas le fait fondamental que nous révèle l'observation, savoir que la vitesse angulaire est plus grande à l'équateur; elle n'explique pas davantage les nombreux mouvements en latitude.

L'hypothèse la plus simple est celle de la contraction due au refroidissement; c'est elle qui explique le plus grand nombre de phénomènes et en particulier ce mouvement plus rapide que possède à l'équateur la couche superficielle. Mais si nous voulons descendre dans l'examen détaillé des cas particuliers, il nous est impossible d'assigner les causes immé-

diates de chacun des mouvements que nous observons. Même en admettant que les taches sont dues à des tourbillons, nous devons avouer notre ignorance sur les circonstances qui déterminent leur formation, car des causes générales et permanentes ne suffisent pas pour expliquer des phénomènes aussi variés et aussi capricieux.

Nous ne connaissons pas la profondeur de la couche gazeuse que nous étudions; si nous considérons la haute température du globe solaire, nous devons penser que cette couche est très-épaisse, et qu'il n'y a point de noyau solide dans le sens que nous donnons ordinairement à ce mot. Dans tous les cas, si ce noyau existe, il doit se trouver à une grande profondeur au-dessous de la surface.



CHAPITRE VII.

VARIATIONS SÉCULAIRES DES TACHES.

§ I. — *Recherches historiques.*

Après avoir étudié la structure et les mouvements des taches, on est naturellement porté à se demander si leurs apparitions à différentes époques sont assujetties à quelque loi générale. Cette question est une de celles qui ont beaucoup occupé les astronomes modernes. Les plus anciens observateurs ont remarqué qu'il n'y a pas chaque année un nombre égal de taches. Il y a eu des époques où il s'est écoulé des mois et des années sans qu'on puisse en observer aucune. Même en admettant que cette dernière affirmation soit un peu exagérée, et qu'elle résulte du peu de précision avec laquelle les observations ont été faites et de la faiblesse des instruments qu'on employait autrefois, il n'en est pas moins vrai que le nombre des taches est extrêmement variable, et qu'il y a des époques où elles sont très-rares.

W. Herschel est le premier qui se soit occupé de cette question; il chercha à établir un rapport entre les variations des taches et la météorologie terrestre, et, à défaut d'autre élément, il compara le nombre annuel des taches au prix du blé; mais, on le comprend, il ne pouvait rien résulter d'un semblable travail. Sans doute, les phénomènes météorologiques du globe doivent dépendre, dans une certaine mesure,

des vicissitudes solaires : nous en verrons une preuve frappante; mais le terme de comparaison choisi par Herschel n'a aucune relation directe avec l'état du Soleil.

De nos jours, cette question a été étudiée à fond par M. Wolf, directeur de l'Observatoire de Zurich. C'est à son zèle qu'on doit un recueil très-riche et très-intéressant du plus grand nombre des observations anciennes, qui étaient ensevelies dans les archives et dans les répertoires; c'est lui qui a cherché à les coordonner, à les rendre comparables, à combler autant que possible les nombreuses lacunes qui existaient entre les différentes séries.

L'observateur le plus attentif, à l'époque où les taches furent découvertes, c'est Scheiner; mais il nous avertit lui-même qu'il n'a pas tenu compte de toutes les taches qu'il a aperçues; il n'a enregistré que celles qui pouvaient lui fournir les éléments de la rotation qu'il cherchait à déterminer. Plusieurs observateurs ont fait après lui des séries d'observations détachées; mais quelques-unes ont été perdues, les autres contiennent de grandes lacunes. Jean Gaspard Staudacher, à Nuremberg, observa avec plus de constance pendant cinquante ans, de 1749 à 1799. Avant lui, les Cassini, Maraldi et autres s'en occupèrent, mais seulement d'une manière indirecte : ils se contentaient, en faisant l'observation méridienne du Soleil, de noter ce qu'il y avait de plus important. Zucconi et Flaugergues nous ont aussi laissé de bonnes séries, que M. Wolf a utilisées en les rendant comparables entre elles par les corrections les plus vraisemblables qu'on puisse employer en pareille circonstance. La difficulté principale vient de ce que tous les observateurs n'ont pas employé des instruments également puissants; celui qui était armé d'une meilleure lunette observait et enregistrait des taches qui auraient échappé aux autres : les nombres inscrits

dans leurs registres d'observation ne sont donc pas comparables entre eux. M. Wolf a cherché à remplacer ces nombres par ceux qu'auraient enregistrés les observateurs s'ils avaient employé des lunettes comparables à un modèle déterminé. Il est résulté de ce travail une chronique presque continue des taches solaires depuis une époque assez reculée jusqu'au moment où cette étude a été reprise avec une grande activité.

C'est le baron Schwabe, de Dessau, qui, dans les temps modernes, s'en est occupé avec plus d'assiduité et de constance. De 1826 à 1868, il n'a pas manqué de faire des observations quotidiennes toutes les fois que le temps l'a permis. Cette série est précieuse, parce qu'elle se relie avec celle de Carrington, et que celle-ci, à son tour, se rattache à celle de M. Spörer et à toutes les observations photographiques et autres, qui se font maintenant de toutes parts. Toutes ces observations, quoique faites par des procédés différents, sont facilement rendues comparables.

De nos jours, il y a plusieurs savants qui observent avec soin les taches solaires; mais, aujourd'hui comme autrefois, il y en a peu qui aient assez de persévérance. La méthode photographique est excellente, mais elle prend beaucoup de temps et occasionne des dépenses considérables. Quelques savants ont décrié les dessins d'une manière injuste : un dessin assez grand, fait sur projection par un habile dessinateur, avec une lunette portée par un mouvement d'horlogerie, peut soutenir la comparaison avec une épreuve photographique, et en opérant ainsi on a plus de chances de persévérer dans ces observations. Nous apprenons avec regret que l'observatoire de Kew a interrompu ses observations photographiques; espérons qu'elles seront continuées à Greenwich avec le même appareil.

§ II. — *Etude statistique du nombre des taches solaires.*

Le baron Schwabe, en étudiant sa longue série d'observations, a reconnu une périodicité très-évidente. Des maxima et des minima très-prononcés se succédaient à un intervalle de dix à onze ans. Il est bien vrai que, dans une pareille étude, il y a des éléments un peu défectueux. D'abord, on ne peut pas observer le Soleil tous les jours, et les lacunes qui résultent du mauvais état du ciel viennent nécessairement augmenter le nombre des jours où il n'y a point de taches. De plus, le nombre des taches est toujours un peu arbitraire; il y a souvent des groupes qui, par leurs subdivisions, se prêtent à différentes manières de compter; mais, dans une masse d'observations aussi considérables que celles du baron Schwabe, ces différences se compensent l'une l'autre et disparaissent dans le résultat final. En effet, la loi est si saillante qu'il suffit de jeter un coup d'œil sur son tableau pour reconnaître qu'aucune objection ne saurait l'ébranler. Ce tableau étant très-intéressant, nous le reproduisons ici, en y ajoutant le résultat des observations faites au Collége Romain pendant les quatorze dernières années. Nous avons aussi ajouté une colonne contenant le résultat des recherches de M. de la Rue sur les observations de Carrington et sur celles de l'Observatoire de Kew.

Les dessins de Schwabe étaient exécutés à une très-petite échelle, 6 ou 7 centimètres de diamètre : aussi les résultats pouvaient être entachés de quelques inexactitudes, et l'on pouvait se demander s'ils seraient assez exacts pour être comparés, par exemple, aux épreuves photographiques. Or cette série se compénètre avec celle de M. Carrington et celle des astronomes de Kew; M. de la Rue, profitant de cette circonstance, a com-

paré les années communes, et le résultat a été très-satisfaisant, de sorte que, en se servant d'un coefficient convenable, on a pu donner à toutes ces observations le même degré de précision. Voici un extrait de la comparaison entre les nombres de Schwabe et ceux de Kew. (*On solar physics*, p. 9.)

	A Dessau.	A Kew.
1862, en 10 mois.........	133	167
1863, en 9 mois.........	91	89
1864, en 12 mois.........	130	115
Total..........	354	371

Les différences ne sont pas exagérées et elles ne sauraient infirmer la valeur des conclusions que nous allons exposer.

La méthode la plus exacte, la seule rationnelle, consiste à évaluer la portion de la surface qui est recouverte de taches; le système qui consiste à évaluer le nombre de taches conduira-t-il au même résultat ou amènera-t-il des conséquences différentes? Pour résoudre cette question, M. de la Rue a fait évaluer la surface totale des taches en millionièmes de l'hémisphère visible. Ce calcul a été fait avec une admirable patience pour les trois séries de Schwabe, de Carrington et des astronomes de Kew; on a évalué séparément l'ombre, la pénombre et l'ensemble, en faisant, bien entendu, la correction relative à la déformation apparente qui se produit à mesure qu'on s'éloigne du centre. Les résultats de cet immense travail sont consignés dans plusieurs tableaux annexés aux savants Mémoires publiés de 1865 à 1870 dans les *Transactions philosophiques*, sous ce titre : *Researches on solar physics*, by W. de la Rue, Balfour Stewart, Benjamin Lœvy. C'est du dernier Mémoire, page 128, que nous avons extrait les nombres relatifs aux années 1832 à 1868, insérés dans le tableau ci-après. Dans cette cinquième colonne, l'unité est le millionième de la surface de l'hémisphère solaire.

Tableau du nombre de taches pendant quarante-sept ans.

ANNÉES.	JOURS d'observations.	JOURS sans taches.	NOMBRE des taches.	SUPERFICIE des taches.	COLLÉGE ROMAIN.
1826	277	22	118	...	...
1827	273	2	161	...	...
1828	282	0	225	...	...
1829	244	0	199	...	...
1830	217	1	190	. .	...
1831	239	3	149	..	...
1832	270	49	84	196	...
1833	267	139	33	73	...
1834	273	120	51	142	...
1835	244	18	173	837	...
1836	200	0	272	1407	...
1837	168	0	333	1236	...
1838	202	0	282	876	...
1839	205	0	162	817	...
1840	263	3	152	575	. .
1841	283	15	102	340	...
1842	307	64	68	209	...
1843	312	149	34	108	...
1844	321	111	52	197	...
1845	332	29	114	396	...
1846	314	1	157	599	...
1847	276	0	257	1127	...
1848	278	0	330	1112	...
1849	285	0	238	755	...
1850	308	2	186	583	...
1851	308	0	141	658	...
1852	337	2	125	522	...
1853	299	4	91	350	...
1854	334	65	67	198	...
1855	313	146	38	82	...
1856	321	193	34	40	...
1857	324	52	98	227	...
1858	335	0	202	763	...
1859	343	0	205	1390	257
1860	332	0	211	1343	251
1861	322	0	204	1310	251
1862	317	3	160	1165	168
1863	330	2	124	749	165
1864	325	4	130	815	97
1865	307	26	93	549	86
1866	349	76	45	199	81
1867	312	195	25	188	32
1868	301	12	101	449	92
1869	179	0	...	...	198
1870	147	0	...	...	305
1871	380	0	...	...	304
1872	315	0	...	...	292

Ce tableau est à la fois intéressant et très-instructif. Les nombres qu'il contient parlent assez clairement, et il suffit de les examiner avec un peu d'attention pour reconnaître l'exactitude des conclusions que nous allons en tirer.

1° Il y a des maxima et des minima périodiques, et l'amplitude de cette période est comprise entre 10 et 12 ans. Pour en déterminer la valeur avec plus de précision, quelques astronomes ont eu recours aux observations anciennes. M. Wolf, de Zurich, a fait à ce sujet un travail intéressant qu'on trouve dans son ouvrage sur les taches solaires (*Mittheilungen der Sonnenflecken*). Il a pu établir la chronologie

Fig. 68.

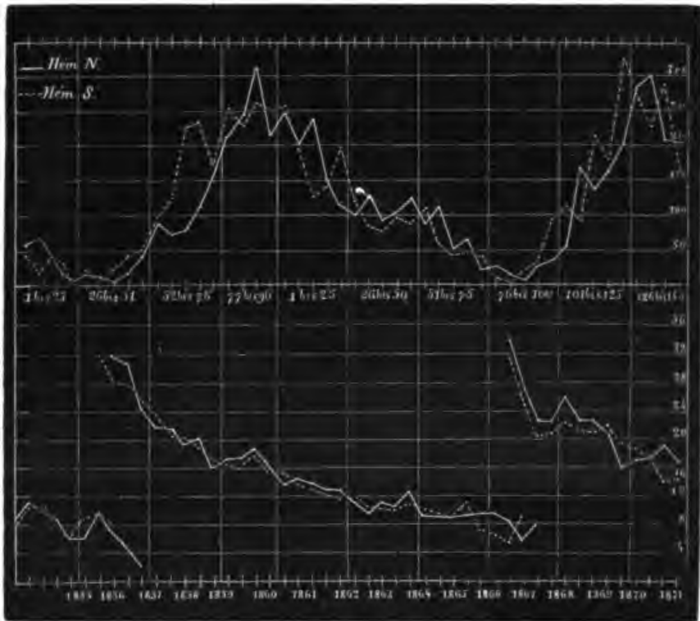


des phases que le Soleil a parcourues depuis la découverte des taches jusqu'à nos jours. Ses calculs l'ont conduit à une période de 11 ans et $\frac{1}{9}$. M. Lamont avait trouvé, de son côté, 10 ans $\frac{43}{100}$; mais ce nombre ne représente pas assez exactement les dernières observations.

2° Chaque maximum est plus rapproché du minimum précédent que du suivant, de sorte que la courbe présente la forme indiquée par la *fig.* 68. L'ordonnée augmente pendant 3 ans $\frac{7}{100}$, elle diminue ensuite pendant 7 ans $\frac{4}{100}$. D'après M. de la Rue, l'accroissement durerait 3 ans $\frac{52}{100}$, et la diminution 7 ans $\frac{55}{100}$. La coïncidence est surprenante, vu la diversité des méthodes qui ont conduit à ces résultats presque identiques, les uns ayant évalué le nombre des taches, les autres ayant mesuré leur superficie. Les différentes pé-

riodes ne sont pas absolument identiques, comme on peut le voir dans la *fig.* 71, extraite des travaux de M. de la Rue (1832-1868); mais on a remarqué que, si dans une période la partie décroissante est retardée ou accélérée, la partie ascendante de la période qui suit s'allongera ou se raccourcira également. D'après cette remarque, on a pu annoncer

Fig. 69.



que la première partie de la période actuelle serait très-accélérée, ce qui s'est vérifié.

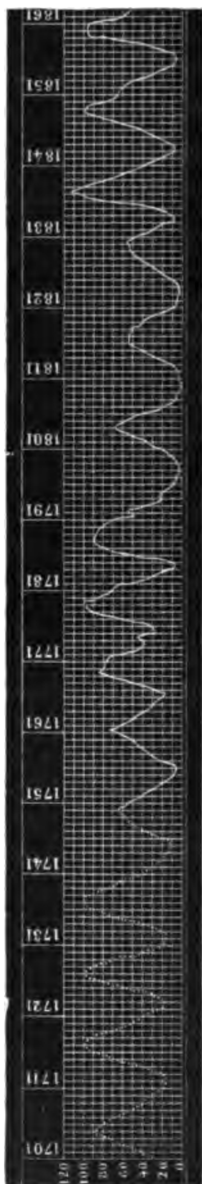
La *fig.* 69, qui n'est qu'une réduction de celle de M. Spörer, indique rigoureusement, dans sa partie supérieure, la marche du phénomène de 1854 à 1871. La ligne continue correspond à l'hémisphère nord, la ligne ponctuée à l'hémisphère sud.

3° Nous empruntons aux travaux de M. Wolf la série des maxima et des minima observés et enregistrés, pour les époques précédentes, par différents observateurs. Nous ajoutons à chacune de ces dates un nombre qui fait connaître avec quelle approximation les différentes époques sont connues. On peut remarquer que l'incertitude est beaucoup plus grande dans les observations anciennes que dans les plus récentes.

Tableau des époques des maxima et minima des taches solaires, par M. Wolf.

MAXIMA.		MINIMA.	
		Série ancienne.	
		1610,8	± 0,4
1615,0	± 1,5	1619,0	± 1,5
1626,0	± 1,0	1634,0	± 1,0
1639,5	± 1,0	1645,0	± 1,0
1655,0	± 2,0	1666,0	± 2,0
1675,0	± 2,0	1679,5	± 2,0
1685,5	± 1,5	1689,5	± 2,0
1693,0	± 2,0	1698,0	± 2,0
1705,0	± 2,0	1712,0	± 1,0
1717,5	± 1,0	1723,0	± 1,0
1727,5	± 1,0	1733,0	± 1,5
1738,5	± 1,5	1745,0	± 1,0
		Série moderne.	
1750,0	± 1,0	1755,7	± 0,5
1761,5	± 0,5	1766,5	± 0,5
1770,0	± 0,5	1775,8	± 0,5
1779,5	± 0,5	1784,8	± 0,5
1788,5	± 0,5	1798,5	± 0,5
1804,0	± 0,1	1810,5	± 0,5
1816,8	± 0,5	1823,2	± 0,2
1829,5	± 0,5	1833,8	± 0,2
1837,2	± 0,5	1844,0	± 0,2
1848,6	± 0,5	1856,2	± 0,2
1860,2	± 0,2	1867,1	± 0,1

Fig. 70.



Afin de mettre cette loi en évidence dans tous ses détails, nous reproduisons (*fig.* 70) la courbe construite par M. Wolf pour résumer la marche des variations annuelles. M. Carrington a construit une courbe tout à fait semblable. Les abscisses représentent les années et les ordonnées le nombre des taches observées.

L'étude de cette courbe montre deux choses : 1° la période est bien undécennale, comme nous l'avions annoncé; 2° cependant elle n'est pas aussi simple qu'on pourrait le croire au premier abord; en réalité, il y a deux périodes superposées, l'une semi-séculaire, l'autre undécennale; nous n'avons pas d'observations anciennes assez précises pour reconnaître la loi de la variation séculaire, nous ne pouvons que constater son existence.

Les derniers travaux de M. Wolf fixent la durée de cette période à 55 ans $\frac{1}{2}$. Selon Loomis, une période de calme régna entre 1810 et 1825.

3° Il est intéressant de comparer les époques obtenues par M. Wolf pour les maxima et les minima avec celles de M. de la Rue. Les époques de M. de la Rue sont les suivantes :

Minimum.	Maximum.
1833,91	1836,97
1843,72	1847,87
1856,30	1859,67
1867,12	

Intervalles entre les minima.

	Ans.
1er	9,81
2e	12,58
3e	10,58
Moyenne......	10,99

Intervalles entre les maxima.

	Ans.
1er	10,90
2e	11,80
Moyenne......	11,35

Ces nombres s'approchent beaucoup de la période de 11 ans $\frac{1}{9}$ trouvée par M. Wolf; avec un aussi petit nombre de périodes, il était impossible d'espérer mieux.

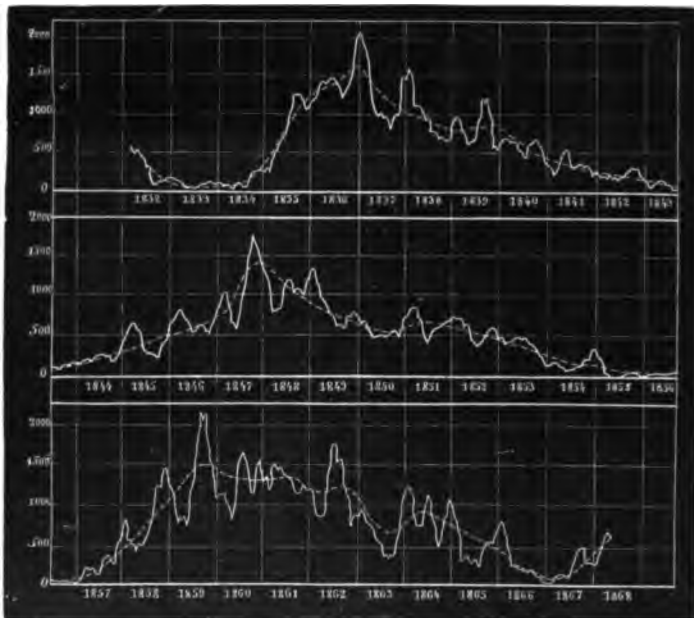
4° Il y a cependant de grandes irrégularités dans le détail des différentes séries; pour en donner une idée, nous reproduisons ici (*fig.* 71) la courbe donnée par M. de la Rue (1), sur laquelle on peut suivre la marche accidentée du phénomène. La ligne ponctuée indique les valeurs moyennes, la ligne pleine fait connaître les valeurs réelles.

La phase la plus saillante de cette courbe, c'est une recrudescence très-sensible qui se produit très-peu de temps après le maximum proprement dit.

(1) *Philosophical Transactions, Pl. XXXI;* 1870.

5° Les passages des maxima aux minima sont accompagnés d'une circonstance assez curieuse. En disposant les taches d'après leur longitude et leur latitude sur un diagramme assez

Fig. 71.



serré, M. Carrington a montré que leur latitude va en décroissant à mesure qu'on approche du minimum; puis, lorsque leur nombre va en croissant, elles se montrent à une latitude plus élevée. Cette loi se vérifie encore dans la dernière période, à partir du dernier minimum qui s'est produit en 1867, comme il résulte des observations de M. Spörer et des nôtres. Le tableau suivant peut servir à étudier le fait que nous venons de signaler; la *fig.* 69, construite, dans sa partie inférieure, d'après le même tableau, montre encore mieux la manière dont varient les latitudes, et comment elles passent quelquefois sans transition d'une valeur à une autre.

Tableau des latitudes moyennes et des fréquences des taches observées par M. Spörer.

	Hémisphère nord.		Hémisphère sud.		Les deux hémisphères.	
	Fréquence.	Latitude.	Fréquence.	Latitude.	Fréquence.	Latitude.
		° '		° '		° '
1854	138	10.26	90	9.39	228	9.91
1855	46	7.2	48	8.35	94	7.79
1856	21	8.33	9	9.0	30	8.53
	3	31.7	32	28.72	35	28.97
1857	9	3.4	//	//	310	23.9
	144	23.56	157	24.36		
1858	236	20.67	526	20.57	762	20.60
1859	432	17.33	537	17.07	969	17.18
1860	712	17.80	695	16.76	1407	17.29
1861	622	14.22	563	14.48	1185	14.34
1862	373	12.74	400	11.98	773	12.34
1863	306	10.79	262	10.43	568	10.62
1864	283	11.07	244	10.16	527	10.66
1865	200	9.26	172	10.16	372	9.67
1866	101	9.36	83	8.40	184	8.93
1867	43	7.96	8	7.44	51	7.88
	13	26.84	52	22.92	65	23.71
1868	178	24.94	278	21.83	456	23.05
1869	428	21.68	479	21.63	907	21.65
1870	738	16.96	765	18.88	1503	17.94
1871	509	17.68	582	14.64	1091	16.06

6° Les variations des taches rappellent naturellement les obscurcissements du Soleil qui, au dire des historiens, se sont produits en plusieurs circonstances; mais il faut procéder avec beaucoup de discernement. Un grand nombre de ces phénomènes qui ont attiré l'attention du peuple ne sont que des éclipses mal observées et encore plus mal décrites ([1]). Dans d'autres circonstances, l'obscurcissement a été produit par des brouillards secs très-persistants; tel est probablement

([1]) M. Roche, *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXIII, p. 384.

celui qui, au dire de Kepler et de Gemma-Frisius, eut lieu en 1547. Il n'est pas impossible que quelqu'un de ces phénomènes soit dû au passage d'un nuage de matière cosmique, ou à une quantité prodigieuse de petites taches, ou encore à une condensation extraordinaire de matière absorbante à la surface de la photosphère; mais nous ne saurions rien affirmer de certain à cet égard.

C'est ainsi que, d'après Virgile, qui s'est fait l'écho d'une tradition qu'on retrouve dans l'histoire, le Soleil s'est obscurci à la mort de César :

> Ille etiam extincto miseratus Cæsare Romam,
> Quum caput obscura nitidum ferrugine texit,
> Impiaque æternam timuerunt sæcula noctem.

En l'an 553 et en l'an 626 de l'ère actuelle, le Soleil resta obscurci pendant plusieurs mois; mais ces faits, d'ailleurs mal observés, et rapportés sans doute avec beaucoup d'exagération, se sont présentés à des époques qui paraissent complétement indépendantes les unes des autres, tandis que les variations que nous venons d'étudier offrent une régularité presque mathématique.

§ III. — *Recherches sur les causes de la périodicité des taches.*

Une périodicité aussi bien constatée devait naturellement inviter les astronomes à rechercher les causes qui peuvent la produire. La seule présence des taches dans la région zodiacale avait fait soupçonner à Galilée une relation de dépendance entre les taches et la position des planètes (¹); mais il

(¹) Seconde lettre à Velser.

n'y a là qu'un soupçon qui n'est pas suffisamment justifié. Il nous est impossible de rien affirmer de certain sur cette question. La cause déterminante de la périodicité peut être intérieure au corps solaire, et dépendre de circonstances qui nous resteront à jamais cachées. Elle peut aussi être extérieure : elle peut être due à l'influence des planètes ou à l'action du milieu que traverse le Soleil. Cette dernière hypothèse est peut-être moins probable; il ne nous reste alors à examiner que l'influence des planètes.

D'après M. Wolf, leur attraction serait la cause réelle de la périodicité qui nous occupe, cette attraction produisant à la surface du globe solaire de véritables marées qui donnent naissance aux taches, et ces marées elles-mêmes ayant des variations périodiques dues aux déplacements périodiques des astres qui les produisent. On avait même cru pouvoir affirmer que la période principale coïncidait avec la révolution de Jupiter; mais M. Carrington a fait voir que cette coïncidence, purement accidentelle dans une époque, ne se reproduit pas dans les périodes suivantes, et qu'on n'en peut tirer aucune conclusion sérieuse (1). L'action de Mercure et de Vénus serait peut-être plus efficace. Leur distance au Soleil est peu considérable, ce qui rend leur influence plus sensible; mais, d'un autre côté, leur masse nous paraît bien faible pour produire de semblables effets. On ne peut donc pas trancher cette question sans un examen sérieux; c'est aux astronomes mathématiciens qu'il appartient de l'étudier et de la résoudre par le calcul.

---

(1) Nous sommes vraiment surpris de voir souvent citer M. Carrington comme favorable à la coïncidence de la révolution de Jupiter avec la période des taches : c'est lui, au contraire, qui a démontré que cette coïncidence est purement accidentelle pour l'époque particulière qu'on avait examinée.

M. de la Rue et ses savants collègues, MM. Stewart et Lœvy, ont laborieusement étudié ce point de la physique solaire. Ils paraissent être arrivés à cette conclusion que les conjonctions de Vénus et de Jupiter ont une certaine influence sur le nombre des taches et sur leur latitude, et que cette influence est moins considérable lorsque Vénus se trouve dans le plan de l'équateur solaire. Et, de fait, un grand nombre des inégalités de la courbe reproduite plus haut (*fig.* 71) correspondent réellement avec des positions particulières de ces deux planètes.

Pour reconnaître avec plus de précision ces coïncidences et l'importance qu'il convient d'y attacher, M. de la Rue a fait un dernier travail dans lequel il a analysé séparément différents groupes de taches, s'attachant principalement à celles qui ont donné lieu à des séries d'observations plus continues et plus complètes, surtout lorsque les observations correspondent à la partie de la révolution la plus centrale. Après avoir étudié 794 groupes différents, il est arrivé aux conclusions suivantes :

1° Si nous menons un méridien passant par le milieu du disque solaire et représenté par un diamètre perpendiculaire à l'équateur, on trouve que la grandeur moyenne des taches n'est pas la même par rapport à ce méridien. Il paraît certain que la correction de perspective ne suffit pas pour expliquer cette différence, et qu'il faut introduire un autre élément pour obtenir que les dimensions apparentes des taches soient les mêmes de part et d'autre. L'explication de ce fait n'est pas encore bien certaine; voici la plus probable : les taches sont entourées d'un bourrelet saillant qui semble disparaître en partie pendant le trajet. Ce bourrelet est plus relevé sur le bord antérieur que sur le bord postérieur; il en résulte que les taches doivent paraître plus pe-

tites lorsqu'elles sont dans la partie orientale du disque, plus grandes lorsqu'elles sont dans la partie occidentale; car, dans la première position, la vue rencontre un obstacle plus élevé qui cache une partie de la tache elle-même.

2° M. de la Rue a étudié particulièrement les taches observées à l'époque où les planètes inférieures, Vénus et Mars, se trouvent à des distances héliocentriques de la Terre égales à 0, 90, 180, 270 degrés; comme les taches qui correspondent à ces époques sont nécessairement peu nombreuses, il y a ajouté celles qui correspondent à des positions peu différentes, et il est arrivé à ce résultat : les taches sont plus grandes dans la partie du Soleil qui est opposée à Vénus et à Mercure, elles sont plus petites du côté de ces deux planètes. On obtient le même résultat, soit avec les figures de Carrington, soit avec les photographies de Kew.

3° Cependant on ne remarque pas que Jupiter ait une semblable influence. La révolution de cette planète est de si longue durée qu'on n'a peut-être pas encore fait un assez grand nombre d'observations. Cette influence devrait être facile à remarquer, car si l'on calcule l'action des planètes comme on le fait pour les marées, en la regardant comme directement proportionnelle aux masses et inversement proportionnelle au cube des distances, l'influence de Jupiter l'emporte de beaucoup sur celle de Vénus.

Quoi qu'il en soit, on doit avoir une haute estime pour ces travaux si éminemment propres à nous éclairer sur les relations qui existent entre les taches et la position des planètes.

M. Wolf croit apercevoir une certaine influence de Saturne; mais, on nous permettra de le dire avec franchise, il est trop facile de se faire illusion dans la manière de grouper et de combiner les nombres pour que nous puissions admettre ce dernier résultat.

M. de la Rue a remarqué que les grandes taches sont généralement situées aux extrémités d'un même diamètre. Cette même loi s'applique aussi bien souvent au développement des grandes protubérances. Cette coïncidence s'accorderait bien avec l'hypothèse d'une action analogue à celle qui produit les marées.

Quel que soit le degré de probabilité de ces explications, nous ne devons pas nous dissimuler que nous sommes encore loin d'une démonstration rigoureuse. Si nous considérons avec attention les variations périodiques des taches, nous ne tarderons pas à nous convaincre qu'il est impossible de les relier directement avec une fonction astronomique quelconque, car les taches se présentent d'une manière soudaine et irrégulière qui contraste trop manifestement avec l'action continue et progressive des perturbations de la Mécanique céleste. Il n'y a qu'une réponse à faire à cette objection. Les taches et leurs variations seraient des manifestations visibles de l'activité périodique du Soleil, activité qui dépendrait elle-même de l'action des planètes et de leurs positions relatives. La cause ainsi définie de l'activité du Soleil peut être très-régulière ; cette activité elle-même peut varier d'une manière continue sans que les phénomènes qui en résultent possèdent les même continuité et la même régularité. C'est ce que nous voyons sur la Terre dans la succession périodique des saisons. La position du Soleil, et par conséquent sa manière d'agir sur notre globe varient avec une continuité remarquable, et cependant les phénomènes météorologiques qui en résultent sont irréguliers et capricieux. Nous verrons bientôt que les savants inclinent de plus en plus à croire que les taches ne sont que des effets secondaires produits par des causes plus importantes et plus radicales.

Qu'il y ait là quelque mystère caché, c'est ce qui résulte

avec évidence de ce fait très-curieux que la période undécennale de la variation des taches coïncide d'une manière aussi inattendue que certaine avec la période des variations du magnétisme terrestre. Nous nous contentons d'indiquer ce fait important, nous réservant d'en parler en détail lorsque le moment sera venu.

Quelle que soit notre ignorance relativement aux causes qui peuvent produire les variations de l'activité solaire, nous pouvons du moins tirer une conclusion des remarques précédentes : c'est que le Soleil est loin d'être parvenu à un état de calme et de tranquillité; il est, au contraire, le siége d'une immense activité; cette activité est sujette à de nombreuses variations périodiques qui doivent, à leur tour, influer sur l'intensité de ses radiations calorifiques et lumineuses, et réagir ainsi sur les planètes qui reçoivent de lui la chaleur, la lumière et la vie.



LIVRE III.

DE L'ATMOSPHÈRE SOLAIRE.

INTRODUCTION.

Dans les Chapitres précédents, nous avons souvent parlé d'une atmosphère gazeuse et transparente enveloppant le Soleil, et dont l'existence résulterait nécessairement des idées que nous avons admises sur la nature de la couche photosphérique. Nous devons maintenant aborder l'étude de cette atmosphère et examiner les preuves directes de son existence. Ces preuves seront déduites : 1° de l'absorption qu'elle exerce sur les radiations lumineuses, chimiques et calorifiques; 2° des études spectroscopiques; 3° des phénomènes qu'on observe pendant les éclipses totales. Ce troisième Livre sera consacré aux deux premières questions; nous parlerons des éclipses dans le quatrième.

CHAPITRE PREMIER.

ABSORPTION DES RADIATIONS PAR L'ATMOSPHÈRE SOLAIRE.

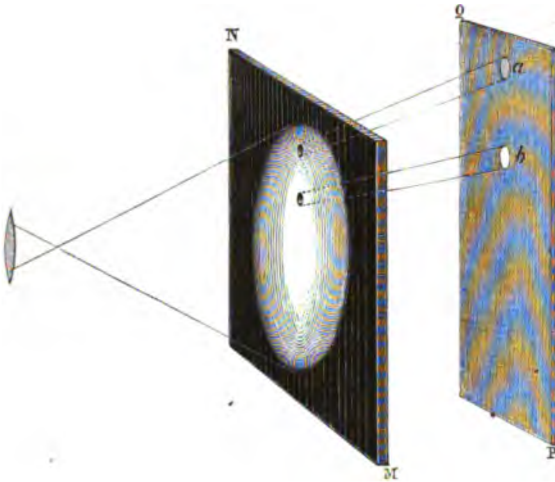
Dès les premiers temps où commencèrent les études sur le Soleil, Lucas Valérius, de l'Académie des Lincei, fit remarquer que l'image du Soleil est plus brillante au centre que sur les bords. Ce fait important fut révoqué en doute par Galilée [1], mais il était exact. Pour s'en convaincre, il suffit d'examiner un instant, dans une chambre noire, l'image du Soleil produite à l'aide d'une bonne lunette sur un écran blanc; on reconnaît immédiatement que les bords sont beaucoup moins lumineux. Scheiner dit quelque part [2] : *Sol circa margines fulvus est, et in medio clarior*. Il remarqua que cette couleur rougeâtre qui caractérise les bords du disque est un peu fuligineuse, et qu'elle n'a pas de limites nettement tranchées. Bouguer essaya de déterminer par des mesures photométriques le rapport qui existe entre l'intensité lumineuse du centre et celle d'un point situé à une distance égale aux trois quarts du rayon; il trouva ce rapport égal à $\frac{1}{0,729}$; mais près des bords l'intensité décroît beaucoup plus vite.

Arago révoqua en doute les résultats trouvés par Bouguer, mais personne ne les conteste plus aujourd'hui, et nous les

(1) Galilée, *Œuvres*, t. VI, p. 198.
(2) *Rosa Ursina*, p. 621.

avons vérifiés nous-même en présence de savants très-compétents. Pour faire ces mesures avec précision, voici le procédé que nous avons employé. Notre équatorial étant renfermé dans un dôme transformé en chambre noire, nous avons, à l'aide d'un puissant oculaire, produit une projection du Soleil ayant environ 1 mètre de diamètre. Afin d'affaiblir davantage la lumière, ce qui est une condition essentielle pour

Fig. 72.



apprécier les intensités relatives, nous mettions un diaphragme à l'objectif, et nous faisions réfléchir le rayon émergent sur l'hypoténuse d'un prisme à angle droit. L'image ainsi produite comprenait à peu près la moitié du disque solaire; on la recevait sur un écran noir MN (*fig.* 72) ayant deux ouvertures de 1 centimètre de diamètre, et les deux faisceaux lumineux *a* et *b*, reçus sur un écran blanc PQ, étaient examinés par un procédé photométrique. Les deux ouvertures étant mobiles, on pouvait étudier des faisceaux pris à volonté dans une partie quelconque du disque solaire.

Lorsque les rayons ainsi étudiés appartiennent au centre

de l'image, on trouve que la lumière est blanche, et que son intensité est à peu près la même dans tous les points. Lorsqu'on dépasse le quart du rayon, on trouve une différence très-sensible ; mais, lorsqu'on arrive auprès du bord, la différence devient extrêmement grande, non-seulement pour l'intensité, mais aussi pour la couleur ; la lumière émise par cette partie du Soleil est d'un rouge enfumé, et cette circonstance présente un obstacle très-sérieux à l'exécution des mesures photométriques. Ce phénomène est très-important, car cette coloration des bords du disque explique parfaitement la teinte que présente l'horizon pendant les éclipses, au moment où le Soleil ne nous éclaire que par cette zone extérieure.

L'appareil étant disposé de manière que l'un des deux faisceaux partît du contour même du disque, l'autre d'un point situé à une distance du centre égale aux trois quarts du rayon, le faisceau le plus brillant fut reçu sur un prisme biréfringent, et l'on obtint ainsi deux nouvelles images dont chacune était plus brillante que celle qui émanait du bord.

Afin d'évaluer plus facilement l'intensité relative des deux faisceaux, on fit usage d'un photomètre à roue mobile dont les ouvertures étaient variables, et que l'on pouvait faire tourner très-rapidement à l'aide d'un engrenage. Nous trouvâmes ainsi qu'en des points situés, l'un à 1 minute, l'autre à 5 minutes du bord, les intensités lumineuses étaient dans le rapport de 1 à 3. De plus, au second de ces points, l'intensité lumineuse était les $\frac{2}{3}$ de celle du centre, de sorte que le rapport entre le point le plus éloigné et le centre serait $\frac{1}{3} \times \frac{2}{3} = \frac{2}{9} = \frac{1}{4,5} = 0,22$. En prenant des points plus rapprochés du bord, l'intensité serait encore plus faible, mais elle devient très-difficile à évaluer, à cause de la teinte rougeâtre que possède cette région. Les résultats que nous don-

nons ici sont plus saillants que ceux de Bouguer; nous ne les croyons cependant pas exagérés, et on les trouvera probablement trop faibles si l'on reprend les mêmes expériences, en tenant compte de la différence de couleur dans l'évaluation des intensités. On peut maintenant se rendre compte du manque de netteté et de précision que présente le bord du Soleil dans les observations ordinaires, et surtout dans l'observation des éclipses.

Il est impossible de douter de l'existence d'une couche atmosphérique quelconque dont le pouvoir absorbant produit cette diminution de l'intensité lumineuse ; on peut seulement se demander comment elle est constituée. Est-elle élevée et diffuse comme notre atmosphère qui produit des effets semblables pour les rayons qui la traversent horizontalement, soit dans un sens, soit dans l'autre? Est-elle, au contraire, peu épaisse, mais d'une grande densité, et produisant son effet d'après une loi toute différente? Pour répondre à ces questions, on ne peut pas se contenter d'expériences dans lesquelles l'action physiologique des rayons lumineux est la seule règle. Nos sens ne sont pas d'assez bons juges, leurs appréciations n'étant pas toujours comparables; il faut avoir recours à des observations plus exactes et susceptibles d'une plus grande précision. Disons seulement que la rapidité avec laquelle la lumière décroît près des bords porte à admettre une atmosphère assez mince et fortement absorbante.

Sans cette absorption, le Soleil serait, comme la Lune, uniformément lumineux sur toute sa surface; nous pouvons même dire que les bords seraient plus brillants que le centre. Nous savons, en effet, que la surface de la photosphère est parsemée de granulations très-nettes qui disparaissent près des bords. Ces granulations résultent des cônes ou mamelons lumineux qui se détachent sur un fond noir; à mesure qu'on

s'éloigne du centre, ces cônes mamelonnés se projettent l'un sur l'autre et finissent ainsi par cacher complétement le réseau noir; le bord devrait donc être plus brillant, puisqu'il n'offre à nos regards qu'une surface lumineuse exempte du réseau obscur qu'on voit au centre. Un astronome distingué a supposé, il est vrai, que le réseau noir s'élève au-dessus des cônes lumineux au lieu d'être situé plus bas; mais ce n'est qu'une hypothèse, et elle ne repose pas sur des raisons assez positives pour que nous nous arrêtions à la réfuter.

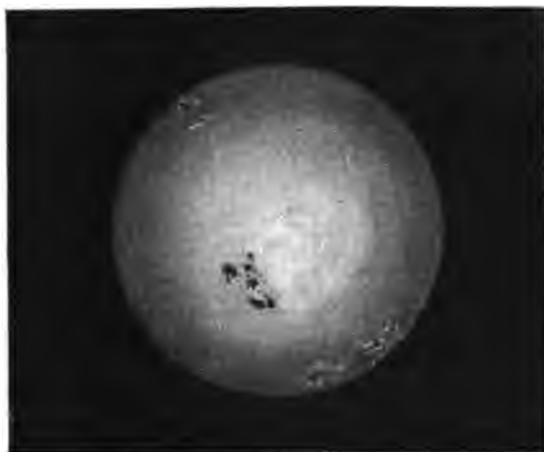
§ II. — *Absorption des rayons chimiques.*

Il y a aussi de grandes différences entre les radiations chimiques qui émanent des différents points du disque solaire. Nous avons pu constater ce fait en fixant sur des plaques daguerriennes plusieurs phases de l'éclipse de 1851. Dans ces épreuves, le bord intérieur du croissant était parfaitement tranché, tandis qu'on pouvait à peine définir la limite extérieure du corps solaire. Depuis lors, toutes les observations photographiques ont confirmé ce résultat.

Nous avons déjà donné la figure de M. Rutherfurd, où la variation de l'intensité est nettement accusée; nous reproduisons ici (*fig.* 73) la photographie faite à Ely avec l'héliographe de M. Selvyn, dans laquelle on reconnait parfaitement la diminution du pouvoir photogénique. Cette diminution est assez grande pour empêcher d'employer la Photographie dans l'étude des dimensions du Soleil; car le diamètre de l'image dépend de la durée de l'exposition, ou de ce qu'on appelle dans les photographies ordinaires le *temps de pose*. Nous avons fait des photographies dans le but spécial de déterminer cette différence. Lorsque la plaque sensible était ex-

posée à la lumière pendant un temps aussi court que possible, on pouvait apprécier la diminution de la lumière dans une étendue égale au tiers du rayon à partir du bord ; mais, lorsque l'exposition était plus prolongée, c'est à peine si cette diminution était sensible, même auprès du bord. De plus, le diamètre de l'image devient notablement plus grand lorsqu'on augmente la durée de l'exposition. Nous avons fait successi-

Fig. 73.



vement deux épreuves en opérant chaque fois de la même manière, mais en réglant la largeur de la fente glissante qui laisse pénétrer la lumière de manière à avoir des intensités qui soient dans le rapport de 1 à 10. Ces deux épreuves, qui auraient dû avoir le même diamètre, différaient de 2 millimètres, ce qui, pour une valeur totale de 141 millimètres, donne la différence énorme de 27 secondes. Nous avons encore conclu de ces expériences que sur le disque solaire, à 13 secondes du bord, l'intensité des radiations chimiques est plus faible que sur la pénombre des taches; car, dans les

épreuves obtenues par les procédés les plus rapides, on distinguait parfaitement la pénombre, tandis que le contour du disque n'était pas reproduit.

La détermination du diamètre solaire par les observations photographiques est donc très-incertaine, et c'est à tort que certains savants proposent de supprimer complétement les observations optiques pour y substituer la Photographie. Nous parlerons plus tard des autres inconvénients que présente le procédé photographique lorsqu'on l'emploie pour étudier les différentes phases des éclipses de Soleil.

On devra se prémunir contre ces difficultés si l'on veut employer la Photographie pour étudier le passage de Vénus en 1874. Lorsqu'on veut obtenir des épreuves où le contour du disque soit nettement tranché, l'action de la lumière doit durer assez longtemps; mais alors les taches disparaissent presque complétement, et les pénombres sont complétement effacées, comme nous l'avons remarqué en Espagne. Il est vrai que l'image de Vénus ne saurait disparaître de la même manière, car elle se détachera sur le disque du Soleil comme un cercle complétement noir; mais la diffusion du pouvoir chimique pourra exercer une certaine influence, et il se présentera d'autres difficultés que nous ne saurions discuter ici. Les observateurs ont déjà étudié toutes les difficultés qui doivent se présenter, et nous attendons avec impatience le résultat de ces expéditions lointaines ([1]).

La disparition des taches dans les épreuves photographiques s'accorde parfaitement avec les mesures photométriques de M. Chacornac, donnant à l'intensité lumineuse des

---

([1]) L'impression de ce volume sera trop avancée au moment où nous connaîtrons les résultats de ces observations pour que nous puissions en entretenir nos lecteurs; mais nous donnerons dans le tome II un exposé des dernières découvertes.

bords solaires une valeur à peu près égale à celle des pénombres; car l'image du bord n'est parfaitement venue qu'au moment où les taches sont à peu près effacées.

Outre l'affaiblissement général qu'éprouve l'action photogénique auprès des bords, on remarque sur le disque des régions dont l'action est moins énergique; on serait porté à attribuer ces inégalités à la préparation chimique, mais elles se reproduisent avec tant de constance dans les différentes épreuves qu'elles doivent évidemment correspondre à des inégalités dans le pouvoir photogénique. Il est difficile de mesurer avec exactitude ces variations, et cette mesure n'a pas encore été faite. Il est plus facile d'étudier les variations de température, et nous allons exposer les méthodes que nous avons suivies dans cette mesure.

§ III. — *Absorption des rayons calorifiques.*

Pour déterminer la température relative des différents points du Soleil, nous nous sommes servi de l'appareil destiné aux projections; l'écran sur lequel se produit l'image était percé au centre d'une ouverture derrière laquelle on plaçait une pile thermo-électrique extrêmement sensible. Le galvanomètre était placé sur un support scellé au mur, de manière à éviter toutes les vibrations qu'aurait pu produire le mouvement du dôme. Un diaphragme, recouvert de velours noir, était placé derrière la pile, afin d'empêcher tous les rayons étrangers de venir troubler l'expérience; dans le même but, on tendait des draps noirs sur le parquet et autour du dôme. Sur le diaphragme antérieur, une règle graduée en parties du diamètre solaire faisait immédiatement connaître la position du point observé par rapport au centre ou au contour.

Dans une première expérience faite le 19 mars 1852 (1), la pile étant complétement ouverte et l'image médiocrement agrandie, la déviation du galvanomètre fut de 31 degrés pour le centre, et de 21 degrés pour une surface égale prise auprès du bord. Afin d'obtenir des résultats plus exacts, on adapta à la pile un diaphragme dont la surface équivalait à peu près à un carré ayant pour côté un arc d'une minute, et l'on régla l'instrument de manière à obtenir des variations de température proportionnelles aux angles d'écart de l'aiguille. Pour rendre les résultats toujours comparables entre eux, on représenta par 100 le rayonnement observé au centre, et l'on obtint ainsi la table suivante :

DISTANCE DE LA PILE au centre du Soleil, exprimée en minutes.	NOMBRE exprimant la radiation de chaque point.
+ 14',90	57,39
+ 11,31	88,81
+ 1,77	99,48
— 10,90	81,32
— 14,88	54,34

Ces observations ont été faites du 19 au 23 mars 1852. Le signe + indique la partie du disque située au-dessus du centre; le signe — indique la partie située au-dessous.

(1) Nous marquons cette date, parce que, dans les *Atti* de l'Académie des N. Lincei, il y a une grande confusion pour les dates des publications. Certaines expériences postérieures aux nôtres ont été publiées à une date antérieure à celle qui leur convient. Personne ne s'est occupé de cette recherche avant nous. On a prétendu que M. Henry, de Washington, nous a devancé; c'est inexact : M. Henry reconnaît lui-même notre priorité. M. Henry et Arago avaient l'intention de travailler cette question, mais par des procédés très-différents des nôtres et qui n'auraient probablement conduit à aucun résultat bien certain. Du reste, ces projets n'avaient pas encore été publiés à l'époque où nous avons fait nos observations.

Dans ces expériences, il nous fut impossible d'approcher du bord à moins d'une minute. Plus tard, en répétant les mêmes observations avec le grand équatorial de Merz, nous avons pu aller plus loin; nous avons trouvé une diminution encore plus sensible, car à une minute du bord l'intensité n'était plus que 0,52 de celle du centre; en nous rapprochant encore davantage du bord, nous avons trouvé qu'elle devenait bien inférieure à 0,50. Mais à cette limite extrême, même en employant les moyens d'observation les plus précis, on rencontre des difficultés qu'il est impossible de surmonter complétement. On est obligé, sous peine d'obtenir des résultats très-irréguliers, de laisser à la pile une certaine ouverture; mais alors la région que l'on examine est loin de posséder une radiation uniforme. De plus il est impossible d'étudier isolément le bord, car les mouvements inévitables de l'image ne permettent pas de le retenir exactement au même point de la pile; aussi nous n'avons pas pu pousser l'exactitude aussi loin que nous espérions, et nous avons cessé de poursuivre ces recherches; cependant les résultats obtenus sont assez intéressants.

Les nombres que nous avons cités dans le tableau précédent conduisent à deux conclusions : I. La température, comme la lumière, diminue, dans le disque solaire, du centre à la circonférence. Ce fait, alors contesté, fut mis hors de doute par nos expériences. II. La chaleur n'est pas symétriquement répartie dans les deux hémisphères. Pour expliquer ce fait, qui ressort évidemment de nos chiffres, on ne peut faire que trois hypothèses : 1° la différence serait due à une influence de l'atmosphère terrestre; 2° elle existerait dans le Soleil lui-même, mais serait purement accidentelle; 3° elle serait constante, et alors elle mériterait d'être étudiée avec soin.

Pour éliminer la première de ces causes, on fit l'étude comparative de deux points situés systématiquement de part et d'autre de l'équateur solaire, en examinant d'abord le point le plus bas, puis en observant le point le plus élevé un peu plus tard, lorsqu'il fut arrivé à la même hauteur que le précédent; cette manière, l'influence de l'atmosphère terrestre, étant la même dans les deux cas, devait disparaître dans les différences. Les résultats furent les mêmes qu'auparavant, ce qui montre que la première hypothèse doit être abandonnée.

La seconde ne vaut pas mieux, car les observations furent prolongées pendant plusieurs rotations consécutives sans que les nombres fussent modifiés.

Les différences sont donc constantes, et leur cause réside dans le Soleil. Mais quelle est cette cause? Est-ce une différence réelle de température? N'était-ce pas plutôt la position particulière de l'équateur solaire, qui se projetait alors sur le disque au-dessus du centre? Pour résoudre cette question, on prolongea les observations jusqu'au mois de septembre, époque à laquelle l'équateur se trouvait projeté sur l'hémisphère opposé. Le résultat fut le suivant : jusqu'au mois d'août, on trouva que la température était plus élevée dans l'hémisphère supérieur; mais plus tard, et surtout pendant le mois de septembre, la différence fut le plus souvent en sens contraire. Le tableau suivant contient les moyennes des résultats obtenus du 8 au 15 septembre :

Distance au centre.	Radiation en degrés.
′	°
+ 14,2	10,3
+ 10,5	14,6
centre 0,0	17,8
— 10,5	15,48
— 14,2	10,4

Ces résultats sont évidemment en désaccord avec ceux du

mois de mars, et la comparaison attentive de ces deux époques conduit aux conclusions suivantes : 1° la température est plus élevée dans les régions équatoriales; 2° cependant l'hémisphère nord paraît un peu plus chaud que l'hémisphère sud.

Pour contrôler ce dernier résultat, que sa singularité même recommandait à notre attention, nous avons employé le procédé suivant.

Soient *bd* (*fig.* 74) l'axe de l'ellipse suivant laquelle se projette l'équateur solaire au mois de mars, *ab* et *cd* les cordes des deux parallèles menées par les extrémités *b* et *d* de cette ellipse. Si l'équateur solaire possède une température plus élevée que les zones voisines, les points *b* et *d* doivent être plus chauds que les points *a* et *c*. Au contraire, lorsque l'équateur se projette suivant *ac* (*fig.* 75), les points *a* et *c* doivent être à une température plus élevée que les points *b* et *d*. Avec cette méthode, on peut éliminer l'effet produit par l'atmosphère terrestre en observant près du méridien. Nous avons fait ainsi un grand nombre d'observations d'abord avec l'équatorial de Cauchoix, puis avec l'équatorial de Merz. Les résultats qui se trouvent exposés dans les Mémoires de notre Observatoire ont toujours été concordants, et ils nous ont fourni les moyennes suivantes :

Fig. 74.

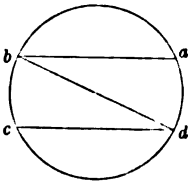
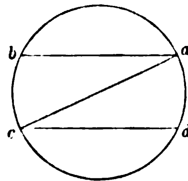


Fig. 75.



1° Pour les mois de mai et juin (*fig.* 74),

a	b	c	d
17°,1	17°,8	16°,6	17°,6

2° Vers la fin de septembre (*fig.* 75),

a	b	c	d
20°, 2	19°, 7	21°, 1	02°, 0

On reconnaît parfaitement que sur l'équateur la température est maximum. De plus, si l'on compare avec l'équateur le 30e parallèle, les températures de ces deux points sont entre elles dans le rapport de 15 à 16. On trouve des différences encore plus saillantes en prenant pour termes de comparaison des points plus rapprochés des pôles; mais nous ne les avons pas utilisés, afin d'éviter l'influence des différences de hauteur et de réfraction. Nous n'avons jamais observé de variations de température aux différentes longitudes; nous n'oserions cependant pas affirmer qu'il n'en existe point, et peut-être en découvrira-t-on dans des recherches postérieures.

Nous avons toujours trouvé une température plus basse dans les taches et dans les régions qui les environnent; aussi avons-nous noté de nombreuses anomalies dans les lois que nous cherchions à reconnaître, lorsque nous étions conduit à observer un point voisin d'une tache. On doit donc, de préférence, faire ces observations aux époques des minima des taches.

Il y aurait lieu de répéter ces observations de temps en temps, afin de voir si les lois que nous avons indiquées sont bien constantes; mais nous en avons été détourné par d'autres occupations. Du reste, ces recherches ne sont pas aussi faciles qu'on pourrait le croire : elles demandent beaucoup de patience; les conditions météorologiques gênent souvent les observations, même dans la saison la plus favorable; aussi beaucoup de séries demeurent-elles incomplètes, et par conséquent inutiles. Ajoutons que, dans les pays

chauds, ces observations sont très-pénibles en été, et cependant c'est alors qu'elles seraient plus faciles et plus profitables.

§ IV. — *Conséquences qui découlent des observations précédentes.*

Les faits que nous venons d'énoncer conduisent directement aux conclusions suivantes :

1° Toutes les radiations éprouvent une absorption considérable qui va en croissant depuis le centre du disque solaire jusqu'au bord, où cette absorption atteint son maximum.

2° Les régions équatoriales sont à une température plus élevée que les régions situées au delà du 30e degré de latitude, et la différence est au moins de $\frac{1}{16}$.

3° La température est un peu plus élevée dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud.

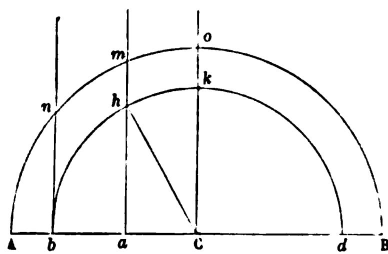
4° De même que les taches émettent moins de lumière, elles émettent aussi moins de chaleur que les autres régions.

La première de ces conclusions nous permet de démontrer rigoureusement qu'il existe une atmosphère autour du Soleil. Pour bien comprendre notre raisonnement, il faut se rappeler les principes sur lesquels s'appuient les astronomes pour analyser les effets dus aux atmosphères des corps célestes.

Soient *bkd* (*fig.* 76) la surface du Soleil, A*o*B la surface extérieure de son atmosphère. Les rayons émis par le corps solaire traverseront une couche atmosphérique dont l'épaisseur sera d'autant plus grande qu'ils seront partis d'un point plus éloigné du centre. La plus petite épaisseur sera *ok*, pour un rayon partant du centre; la plus grande sera *bn*, pour un rayon partant du bord; elle prendra une valeur in-

termédiaire, telle que *hm*, pour un point situé entre le bord et le centre. Des observateurs placés dans le Soleil en ces différents points apercevraient la Terre à des hauteurs zénithales différentes. Au point *k*, correspondant au centre du disque solaire, la Terre apparaîtrait au zénith; du point *b*, on la verrait à l'horizon; du point *h*, situé entre deux, on la verrait à une distance du zénith mesurée par l'angle *h*C*k*. Dans ce trajet, les rayons qui sortent de l'atmosphère solaire se trouvent dans les mêmes conditions, quant aux résultats, que ceux qui pénètrent dans l'atmosphère terrestre; ainsi le

Fig. 76.



maximum d'absorption a lieu pour le bord où le rayon sort horizontalement; le minimum correspond au centre, où le rayon sort suivant la verticale. Il est facile de calculer, d'après la théorie, l'absorption qui correspond à un point donné d'où la Terre serait vue à une distance zénithale θ, cet angle étant également celui que font avec la verticale du lieu les rayons qui se dirigent vers la Terre. En prenant la moyenne des nombres que nous avons donnés dans nos tableaux, on arrive aux résultats suivants :

Distance au centre.	Valeur de θ.	Intensité lumineuse.
′	° ′	
0,00	0. 0	100,00
11,10	43.55	85,06
14,92	68.38	55,86

En introduisant ces nombres dans les formules, on peut calculer l'absorption produite en un point quelconque de la surface solaire; on trouve ainsi qu'en un point qui correspond aux $\frac{3}{4}$ du rayon elle est égale à 0,725. Bouguer avait trouvé 0,729. On ne saurait désirer une coïncidence plus parfaite.

On voit que la quantité de chaleur qui parvient à s'échapper du Soleil se trouve singulièrement réduite par l'action atmosphérique; mais, comme cette action n'est pas la même pour tous les points, on est conduit à se poser les deux questions suivantes : 1° quelle est l'absorption exercée par l'atmosphère dans la direction de sa plus faible épaisseur, c'est-à-dire pour $\theta = 0$? 2° quelle est l'absorption totale, et par conséquent quelle serait la radiation absolue, s'il n'y avait pas d'atmosphère? On peut répondre à ces questions en employant les formules connues, bien qu'elles ne soient qu'approchées, car les données relatives au Soleil ne sortent pas des limites que les astronomes ont adoptées en établissant ces formules.

Les résultats sont inscrits dans le tableau suivant. On trouve dans la première colonne la position du point qui a servi de base au calcul; dans la deuxième, la valeur correspondante de l'angle θ, c'est-à-dire la distance zénithale de la Terre vue du Soleil; dans la troisième, l'intensité de radiation qui reste après l'absorption pour le point situé au centre du disque, la radiation totale étant exprimée par l'unité; enfin la quatrième indique la fraction de la radiation totale qui parvient à sortir de l'atmosphère solaire, et se répand réellement dans l'espace.

POSITION sur LE RAYON.	VALEUR de L'ANGLE θ.	INTENSITÉ RÉSIDUELLE	
		AU CENTRE.	TOTALE.
0,666	43°35′	0,2833	0,1019
0,750	48.34	0,2406	0,0794
0,875	68.49	0,4045	0,1711
	Moyenne...	0,3095	0,1175

Les chiffres de la dernière colonne proviennent de deux sources différentes : ceux de la première et de la troisième ligne résultent de nos observations thermométriques, ceux de la deuxième sont déduits des données de Bouguer. Les résultats inscrits dans la troisième et la quatrième colonne ne sont pas constants, comme ils devraient l'être; ceux qui correspondent aux valeurs $\theta = 43°35'$ et $\theta = 68°49'$ diffèrent presque d'un tiers; cette différence est par trop grande. Il faut en conclure que les lois admises pour l'atmosphère de la Terre ne s'appliquent pas à celle du Soleil. La rapidité avec laquelle se produisent les variations auprès du bord nous avait déjà conduit à la même conclusion, et nous devons penser plus que jamais que l'absorption se produit en très-grande partie dans des couches relativement très-basses, mais douées d'un pouvoir absorbant très-considérable.

Malgré cette difficulté, il y a des conclusions très-frappantes qui demeurent toujours vraies, bien que les nombres ne soient qu'approchés ([1]). Telles sont les suivantes : 1° au centre du disque, c'est-à-dire perpendiculairement à la sur-

([1]) M. Plana a démontré dans les *Astron. Nachr.*, n° 813, que d'une petite erreur dans les données il résulte une assez grande erreur dans les conclusions. De plus, une erreur négative influe sur les résultats plus qu'une erreur positive. *Voir* aussi LAPLACE, *Mécanique céleste*, Livre X, Chapitre XIII.

face de la photosphère, l'absorption arrête les $\frac{2}{3}$ environ, ou plus exactement les $\frac{88}{100}$ de la force totale; 2° l'action totale de cette enveloppe absorbante sur l'hémisphère visible du Soleil est tellement grande, qu'elle ne laisse sortir que les $\frac{12}{100}$ de la radiation totale, le reste, c'est-à-dire $\frac{88}{100}$, étant absorbé. En d'autres termes, si le Soleil était dépouillé de son atmosphère absorbante, il nous paraîtrait huit fois plus chaud et plus brillant qu'il ne paraît actuellement.

Cette influence surprenante de l'atmosphère solaire a l'avantage d'empêcher une dispersion trop grande et trop rapide de la chaleur solaire. La force vive des radiations reste ainsi emmagasinée dans l'atmosphère du Soleil, et contribue à conserver sa haute température. L'absorption ne produit aucune perte réelle; elle ne détruit point les radiations qu'elle arrête au passage; elle empêche une dispersion qui serait inutile et même nuisible pour les planètes. Que deviendrait, en effet, notre globe sous une radiation huit fois plus grande que celle qui se produit actuellement? L'expérience prouve que, dans les climats où le ciel est pur, on ne peut pas impunément rester exposé aux rayons du Soleil si l'on double leur puissance par une simple réflexion sur un miroir plan; si donc le rayonnement devenait huit fois plus considérable, aucune créature ne pourrait plus vivre sur notre planète.

Il faudra tenir compte de cette absorption atmosphérique lorsqu'on voudra essayer d'évaluer la température du Soleil, car les calculs qu'on ferait sans en tenir compte donneraient évidemment un résultat huit fois trop faible.

Du reste, il n'est pas surprenant qu'une atmosphère si considérable possède un grand pouvoir absorbant, car l'atmosphère terrestre, qui nous paraît si transparente, absorbe suivant la verticale un quart des rayons qui tombent sur sa surface supérieure.

L'atmosphère solaire possède-t-elle une absorption élective et une thermochrose spéciale? Melloni nous adressa lui-même cette question, et pour y répondre nous avons eu recours à un grand nombre d'expériences; nous avons fait passer les rayons solaires à travers différentes substances : l'eau, le verre, le quartz enfumé, etc., mais nous n'avons obtenu aucun résultat bien certain. Cela tient évidemment à ce que, à l'influence de l'atmosphère solaire vient s'ajouter celle de l'objectif et de l'oculaire, influence bien suffisante pour dépouiller les rayons qu'on observe des éléments déjà connus comme étant les plus thermochroïques.

Nous verrons plus tard que les radiations solaires ne sont pas homogènes, même lorsqu'elles nous arrivent suivant la verticale, et qu'il existe sans doute une thermochrose; mais cette étude demanderait des instruments plus délicats que ceux dont nous disposons.

La belle expérience de M. Tyndall sur la calorescence, c'est-à-dire sur la transmission isolée des rayons obscurs à travers une dissolution d'iode dans le sulfure de carbone, est un fait qui prouve l'existence d'une véritable thermochrose. Nous en parlerons plus tard en discutant la composition de l'atmosphère solaire; pour le moment, qu'il nous suffise d'avoir constaté l'existence de cette atmosphère, et d'avoir montré l'énorme pouvoir absorbant qui en résulte.



CHAPITRE II.

ANALYSE SPECTRALE DE LA LUMIÈRE SOLAIRE.

AVANT-PROPOS.

Les méthodes qu'emploient les astronomes pour étudier le ciel dépendent nécessairement des progrès de la Physique. Nous venons d'exposer en détail les observations faites il y a peu d'années pour déterminer la nature de l'atmosphère solaire ; il était impossible de faire mieux et d'aller plus loin ; mais, dans les dernières années qui viennent de s'écouler, la science s'est enrichie d'un instrument nouveau et puissant qui permet de pénétrer plus avant dans la connaissance de la matière et de sa constitution intime : cet instrument, c'est le spectroscope. A l'aide de cet admirable appareil, nous pouvons, dans certains cas, reconnaître, même à distance, la nature chimique des corps, et, jusqu'à un certain point, leur état physique. C'est lui qui nous fera connaître d'une manière plus certaine la nature et le mode d'action de l'atmosphère qui environne le Soleil.

Pendant longtemps les astronomes se sont bornés à étudier les mouvements des astres, leurs masses et leurs volumes; l'analyse spectrale nous permet de dépasser les découvertes admirables de nos prédécesseurs; elle nous donne le moyen de déterminer la nature de la matière qui compose les corps célestes. La lumière est le seul agent qui nous mette en relation avec ces mondes lointains; c'est à elle que nous de-

vons demander des renseignements sur leur constitution physique et leur composition chimique

La science de l'analyse spectrale est maintenant assez répandue. Depuis la première édition de ce Livre, on a publié un certain nombre d'ouvrages spéciaux, entre autres l'excellent travail de M. Schellen : *Die spectral Analyse;* les *Lectures on spectrum analysis*, de Roscoë; les *Spectres lumineux*, de M. Lecoq de Boisbaudran ([1]). Nous ne croyons cependant pas pouvoir nous dispenser de donner ici un aperçu sommaire des principes de cette science nouvelle; nous éviterons ainsi au lecteur la peine de recourir à d'autres ouvrages. D'ailleurs l'étude du spectre solaire forme la base de l'analyse spectrale et de ses applications à la physique céleste; c'est pour cette étude qu'on a imaginé les instruments les plus puissants : nous ne devons donc pas nous contenter de passer légèrement sur ce sujet dans un ouvrage sur le Soleil. Ceux d'entre nos lecteurs qui voudraient s'instruire à fond de cette science et de ses méthodes pourront consulter les ouvrages spéciaux; quant à ceux qui sont familiers avec cette étude, ils pourront omettre la lecture de quelques-uns des paragraphes suivants. Nous y avons cependant recueilli des données historiques qui ne seront pas sans intérêt, même pour les personnes les plus instruites.

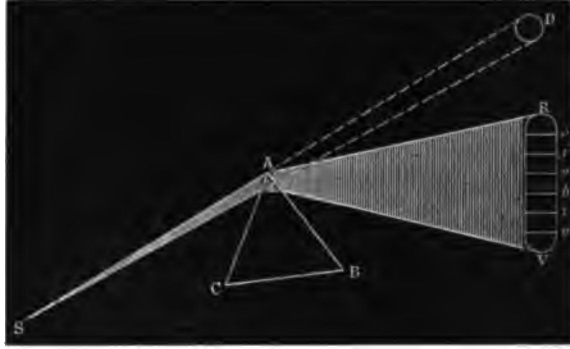
([1]) M. Lecoq de Boisbaudran ne parle pas du spectre solaire, son livre étant destiné aux recherches de Chimie minérale; mais, parmi les spectres qu'il décrit avec beaucoup d'exactitude, il en est plusieurs dont la connaissance est très-utile, indispensable même, pour les recherches solaires.

§ I. — *Premiers travaux sur l'analyse de la lumière solaire par le prisme.*

Il semble qu'en offrant à nos regards les brillantes couleurs de l'arc-en-ciel la nature ait voulu nous inviter à examiner la composition de la lumière et à étudier sa nature. Cependant ce mystère ne fut dévoilé que bien tard. Depuis longtemps on connaît le *verre triangulaire :* c'est ainsi qu'on désignait autrefois le prisme; sa propriété de colorer les objets les plus grossiers et de les transformer en un amas de pierres précieuses, en faisait un amusement vulgaire, mais peu digne de l'attention d'un philosophe. Le P. Grimaldi fut un de ceux qui l'étudièrent avec le plus de soin et de succès. Il perça une ouverture dans le volet d'une chambre noire, introduisit par là un rayon lumineux et lui fit subir l'action du prisme; il put alors observer attentivement le spectre solaire et en donner une description très-soignée. Après cette expérience intéressante, il en fit une autre sur la transmission du rayon solaire à travers des sphères pleines d'eau, puis il proposa une explication de l'arc-en-ciel, dont la théorie mathématique fut donnée plus tard par Newton (Grimaldi, *Physico-mathesis de lumine*, prop. XXX et seq., p. 235, etc.). La *fig.* 77 montre la disposition de la première expérience de Grimaldi. Le rayon solaire SD, reçu par le trou d'un volet dans la chambre obscure, est brisé par l'angle A du prisme ACB; il s'étale en reproduisant les couleurs de l'arc-en-ciel et en dessinant le spectre RV sur la paroi opposée. Newton répéta ces expériences et reconnut que les différents rayons du spectre peuvent subir, sans altération, l'action d'un second prisme.

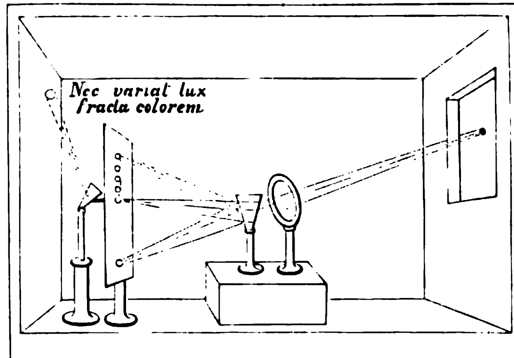
Nous reproduisons la figure originale (78) que Newton envoya à son ami Arland, de Genève, pour lui faire connaître

Fig. 77.



cette découverte, en y ajoutant le mot célèbre : *Nec variat lux fracta colorem* (¹). Cette impossibilité de décomposer un

Fig. 78.



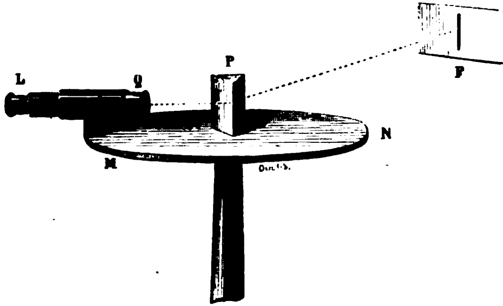
rayon qui a déjà traversé un premier prisme constitue en réalité la découverte de Newton; mais il alla plus loin, re-

(¹) L'original se trouve dans la bibliothèque de Genève, où nous l'avons découvert.

composa la lumière blanche, fixa les noms des différentes couleurs et les proportions dans lesquelles on doit les combiner pour reproduire une lumière analogue à celle du Soleil.

Depuis Newton, Wollaston est le premier qui ait fait faire à cette branche de l'Optique un progrès sérieux. En regardant une fente étroite à travers un prisme, il vit que le spectre, au lieu d'être continu, présentait des lacunes ou raies noires qui le partageaient en plusieurs parties. Cette découverte passa inaperçue; elle resta stérile pour la science, jus-

Fig. 79



qu'au moment où Fraunhofer, voulant déterminer d'une manière précise l'indice de réfraction des verres qu'il employait, aperçut et découvrit de nouveau le même phénomène; il imagina des méthodes pour étudier ces raies, les dessiner et fixer leur position par des mesures exactes.

L'expérience fondamentale de Fraunhofer se fait de la manière suivante. Sur un plateau horizontal MN (*fig.* 79), on place un prisme triangulaire P, de cristal très-pur; à une certaine distance se trouve une fente F, très-étroite, à bords parallèles, éclairée, à l'aide d'un héliostat, par un rayon de lumière solaire. Ce rayon tombe sur le prisme, et, après avoir subi la déviation sous l'angle minimum, il entre dans l'objectif de la lunette QL, qui sert ainsi à étudier les différentes

parties du spectre. Afin de bien discerner les raies, il faut d'abord viser directement la fente, et disposer l'oculaire de manière à la voir nettement; puis, après avoir placé le prisme sur le trajet des rayons lumineux dans la position qui convient au minimum de déviation, on observe avec la lunette, et, en allongeant légèrement l'oculaire, on met au point de manière à voir nettement les raies. Si le prisme est de bonne qualité et si la lunette est achromatique, on apercevra un nombre très-considérable de raies très-fines; on en voit un spécimen dans la *fig.* 3, *Pl. I*, où les principales seulement sont représentées. Cette figure est assez semblable à celle de Fraunhofer; elle a été tracée par M. Van der Willingen. Fraunhofer désigna les raies principales par les lettres suivantes : A dans le rouge extrême, B dans le rouge, C dans le rouge orangé, D dans le jaune orangé, E et *b* dans le vert, F au commencement du bleu, G dans l'indigo, H dans le violet. Ces lettres ont été religieusement conservées; on y a joint des chiffres destinés à faciliter la comparaison avec le tableau des longueurs d'onde que nous donnons plus loin. Les raies ne correspondent pas aux limites qui séparent les couleurs les plus tranchées du spectre. Le lecteur apprendra par la figure déjà citée à reconnaître leur position.

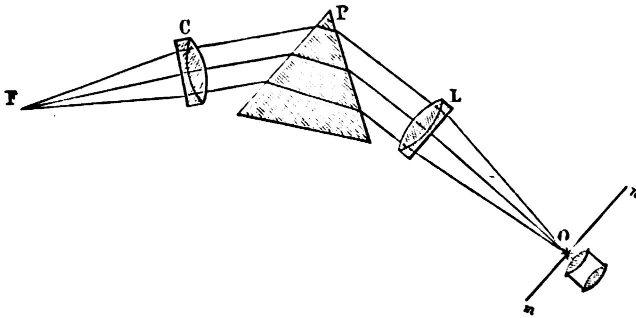
§ II. — *Spectroscopes, ou instruments destinés à observer le spectre solaire.*

Le mode d'observation adopté par Fraunhofer est encore préférable pour un grand nombre de recherches; il a cependant l'inconvénient d'exiger que la fente soit située à une grande distance. Pour la lumière solaire, qui est très-vive, on peut encore dans ces conditions obtenir un spectre assez bril-

lant et distinguer suffisamment les raies. Il n'en est pas de même pour les autres recherches et, en particulier, pour l'analyse de la lumière provenant des autres corps célestes : elle serait impossible par ce procédé.

On l'a donc modifié en rapprochant la fente du prisme; mais, pour maintenir le parallélisme des rayons incidents et afin qu'on ne soit pas obligé d'éloigner l'oculaire à une trop grande distance de l'objectif, on a ajouté entre le prisme et la fente une lentille achromatique dont le foyer coïncide avec

Fig. 80.



la position coupée par la fente. Au sortir de la lentille les rayons sont parallèles entre eux comme si la fente était située à une grande distance; ils traversent le prisme qui les disperse et ils sont ensuite reçus par l'objectif de la lunette. Le système de la fente avec la lentille ainsi disposée constitue ce qu'on appelle le *collimateur*.

Soit F (*fig.* 80) un point de la fente éclairée par une lumière homogène. Les rayons divergents tombent sur la lentille C du collimateur qui les rend parallèles. De là ils traversent le prisme P et sortent parallèles entre eux. Ils tombent ensuite sur l'objectif de la lunette, convergent en O au foyer, où on les observe avec l'oculaire.

Si la lumière n'est pas homogène, chaque rayon aura un foyer différent sur le plan focal *mOn* de l'oculaire, et l'ensemble constituera le spectre.

L'idée d'employer un collimateur dans les spectroscopes ordinaires est due à Zantedeschi, de Padoue; c'est Amici, de Modène, qui l'a adaptée le premier aux instruments destinés à observer les étoiles.

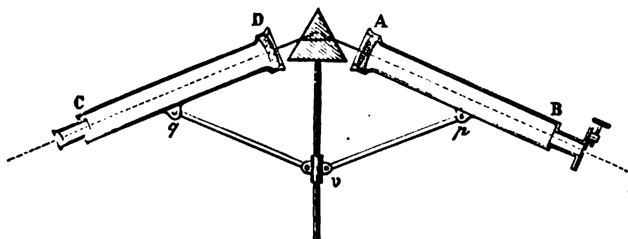
L'instrument de Fraunhofer ainsi modifié s'appelle un *spectroscope*, et l'on peut augmenter son pouvoir dispersif en multipliant le nombre des prismes : de là les spectroscopes simples et les spectroscopes composés. Tout spectroscope est formé essentiellement d'un collimateur, d'une série de prismes et d'une lunette; en enlevant les prismes et en regardant directement la fente on voit un rectangle blanc et très-étroit. On apercevra cette fente sous un angle d'autant plus petit que le collimateur et l'objectif de la lunette seront à plus long foyer. Si l'on remet les prismes dans leur position, à la place de la fente on voit une série de raies brillantes et de raies noires d'autant plus nettes que la fente est plus étroite. Pour essayer le spectroscope, la méthode la plus facile consiste à examiner un tube de Geissler contenant de l'hydrogène raréfié, ou une lampe à alcool salé. On voit dans la lumière du gaz une suite de raies fines dont quatre sont extrêmement brillantes. Avec la flamme de l'alcool salé, ou simplement avec celle d'une bougie où l'on a mis un peu de sel, on distingue dans le jaune deux raies très-fines parfaitement parallèles.

Une des conditions les plus nécessaires pour avoir nettement les raies du spectre, c'est que le prisme soit constamment dans la position qui correspond au minimum de déviation. Pour cela il faut que le rayon incident et le rayon émergent fassent des angles égaux avec les faces des prismes. Or, grâce à la dispersion, l'angle d'émergence n'est pas le même pour

les rayons de couleurs différentes : il faut donc varier la disposition du prisme, surtout pour les rayons les plus réfrangibles. On peut à la rigueur se dispenser de cette précaution pour les petits instruments ; mais elle est nécessaire pour ceux qui ont un grand pouvoir dispersif.

Nous avons employé un appareil qui donne un spectre très-étalé et très-net avec un seul prisme, mais en employant de fortes lunettes (*fig.* 81). AB et CD représentent respectivement le collimateur et la lunette. Le collimateur est fixe, la lunette

Fig. 81.



est mobile sur une règle pouvant tourner autour de l'axe qui supporte le prisme. La lunette et le collimateur sont reliés par deux tiges à charnière *qv* et *pv*. De la monture du prisme part une tige qui entre dans un anneau placé lui-même à l'intérieur de la charnière *v*. Il résulte de ces dispositions qu'en faisant varier l'angle formé par la lunette et le collimateur la tige est toujours bissectrice de cet angle, et que, par suite, le prisme garde sa position qui est celle du minimum de déviation.

M. Kirchhoff est le premier qui ait introduit plusieurs prismes dans le spectroscope. Son appareil (*fig.* 82) se composait de quatre prismes de Steinheil, posés sur une plate-forme à laquelle étaient adaptées de grandes lunettes : c'est ainsi qu'il a fait les recherches nécessaires pour la construction des

grandes planches dont nous parlerons bientôt. Ce spectroscope est puissant, mais il présente l'inconvénient d'exiger des modifications continuelles dans la position des prismes pour obtenir le maximum de déviation. Il est très-difficile d'obtenir ce résultat pour un ensemble de plusieurs prismes. On a longtemps cherché à résoudre ce problème : les solutions proposées ont toujours été compliquées et imparfaites;

Fig. 82.



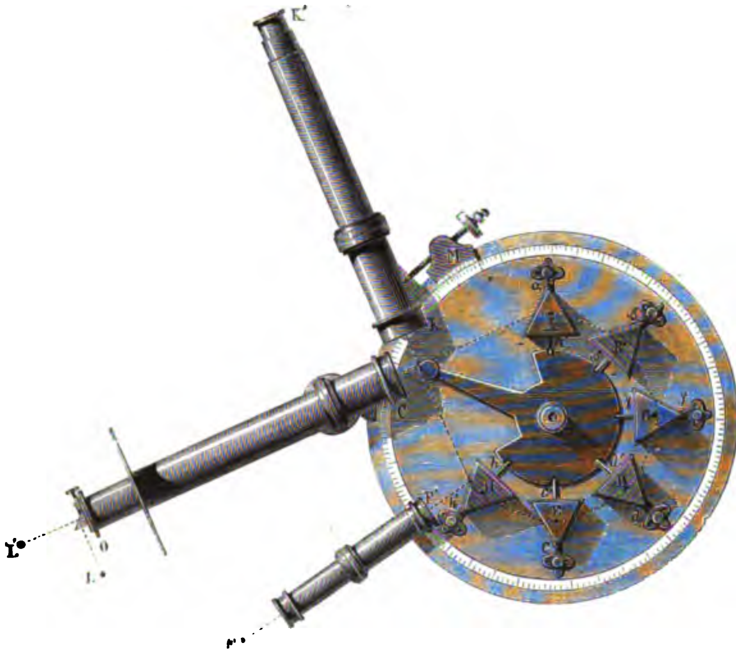
il paraît cependant qu'on réussit actuellement sans trop de difficultés.

Il faut distinguer les spectroscopes destinés aux études de la Chimie de ceux qui doivent être employés à l'étude des astres. Les premiers peuvent être très-lourds, supportés par des pieds massifs et armés de longues lunettes; mais pour l'Astronomie on doit éviter ces machines pesantes, car on doit les adapter aux lunettes qui sont destinées aux observations ordinaires. On doit donc chercher à faire des instruments légers pour conserver l'équilibre des machines; aussi préfère-t-on employer des prismes nombreux et des lunettes très-

courtes, ce qui a encore d'autres avantages pour l'Astronomie.

La *fig.* 83 représente un système de six prismes montés sur une plate-forme; OC est le collimateur, KK' la lunette

Fig. 83.

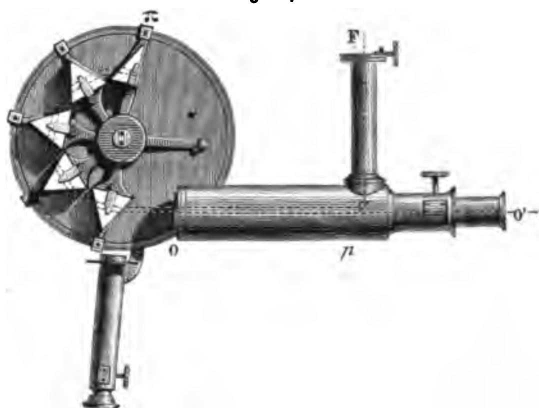


d'observation, et FF' un petit collimateur qui porte, au lieu de la fente, une échelle dont l'image est réfléchie dans la lunette par la face du dernier prisme. Cette échelle sert à prendre approximativement les positions des raies. Si l'on veut plus de précision il faut un micromètre. Les six prismes sont reliés ensemble par une roue; une pièce de cuivre permet de les mettre au minimum de déviation. Cette disposition est très-imparfaite, et de plus elle ne permet

pas d'employer plus de six prismes. M. Lockyer a cependant employé un instrument semblable pour faire ses admirables découvertes.

En combinant la réflexion avec la réfraction, on est parvenu à obtenir une dispersion plus grande avec un plus petit nombre de prismes. M. Janssen, qui eut le premier cette idée, obtint avec deux prismes et demi l'effet qu'on obtient avec cinq par la méthode ordinaire. M. Littrow en employa quatre

Fig. 84.



et demi qui équivalaient à neuf. Pour obtenir ce résultat, le dernier prisme est coupé en deux; sa seconde face est argentée, de manière à réfléchir la lumière; les rayons, après cette réflexion, reviennent sur leurs pas en continuant à se disperser à travers les premiers prismes qu'ils avaient déjà traversés. La *fig.* 84 représente un spectroscope à réflexion construit par M. Secrétan. La lumière pénètre par la fente F, elle est réfléchie par un petit prisme *p* et renvoyée à l'objectif de la lunette O qui fait l'office de collimateur. Elle traverse les quatre prismes et arrive au demi-prisme π. Arrivée là, elle est réfléchie de nouveau et renvoyée à travers les prismes vers

l'objectif, d'où elle se rend à l'oculaire O'. Cet appareil a des avantages sérieux, mais il est difficile de le régler et d'amener exactement les prismes au minimum de déviation.

M. Young, de Darthmouth-College, en Amérique, et M. Grubb, de Dublin, ont imaginé de faire revenir la lumière par un autre procédé. A la face postérieure du dernier prisme (*fig.* 85) ils soudent un prisme rectangulaire ω ; le rayon, entré par le collimateur C, après avoir traversé le système des prismes par leur partie supérieure, pénètre dans le prisme rectangulaire par la face hypoténuse; puis il subit deux réflexions totales sur les côtes de l'angle droit, et revient à travers la partie inférieure des prismes, dans la lunette L. La

Fig. 85.

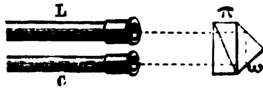


fig. 85 représente la position théorique du collimateur et de la lunette par rapport au prisme réflecteur; on a supprimé les prismes intermédiaires.

La *fig.* 86 représente le spectroscope à réflexion tel que nous l'avons fait construire. Nous y avons introduit une légère modification, afin de pouvoir l'équilibrer plus facilement en l'adaptant à la lunette. Les prismes sont joints ensemble par des charnières situées à leurs angles intérieurs et ils sont placés dans la position qui correspond au minimum de déviation. Cette position n'étant pas la même pour les rayons des différentes couleurs, il a fallu rendre les prismes mobiles et imaginer un mécanisme qui permît de les amener tous en peu de temps dans l'orientation convenable. La monture de chaque prisme porte, à sa partie postérieure, une queue divisée par une fente longitudinale. L'un des bords de cette

fente porte des dents qui engrènent avec un pignon. En faisant tourner ce pignon à l'aide d'un bouton, on met tous les prismes en mouvement, et on les amène ainsi dans les positions successives qui correspondent au minimum pour les dif-

Fig. 86.



férents rayons. Ce mécanisme, qu'on peut appliquer à tous les spectroscopes, permet de passer facilement et rapidement d'une couleur du spectre à une autre, tout en se maintenant dans les meilleures conditions pour observer nettement les raies.

Ces spectroscopes, dont le pouvoir dispersif est considé-

rable, sont utiles pour certaines études ; mais on peut, la plupart du temps, employer des appareils moins puissants. Lorsqu'ils doivent être adaptés à des lunettes, ils peuvent être plus simples et plus commodes.

La *fig.* 87 représente le spectroscope dont nous faisons ha-

Fig. 87.



bituellement usage, et dont on peut modifier la puissance en y adaptant à volonté un nombre de prismes variant de un à cinq. La lettre *t* représente le gros bouton du tube de la lunette équatoriale à laquelle s'adapte l'instrument ; *p* est le cercle de position qui, à l'aide d'une roue intérieure et d'un pignon, sert à faire tourner toute la machine autour de l'axe de la lunette ; *c* est le tube qui contient le collimateur ; *r* re-

présente les plateaux qui portent les prismes et qui peuvent se séparer à volonté; *f* est le tube de la lunette du spectroscope; *o* l'oculaire à réflexion latérale qui permet à l'observateur de prendre une position plus commode. A la hauteur du point *c* se trouve une large ouverture par laquelle on voit la fente du collimateur et l'image du Soleil qui s'y projette; nous recommandons beaucoup l'emploi de cette ouverture, car elle facilite singulièrement les recherches spectrales, surtout pour les bords du Soleil. Le pouvoir réfringent de ces prismes est tel, que le rayon émergent est parallèle au rayon incident pour les rayons jaunes. Si l'on veut rendre la dispersion plus considérable, on n'a qu'à ajouter deux prismes à vision di-

Fig. 88.



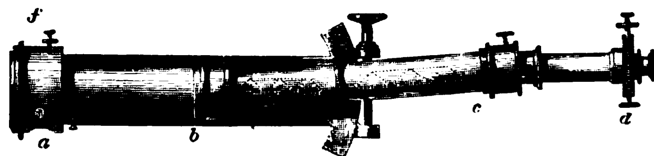
recte, l'un entre l'objectif de la lunette et les prismes, et l'autre entre les prismes et l'objectif du collimateur. Nous nous contentons ordinairement d'un seul de ces prismes additionnels. Afin de ne pas trop compliquer la figure, on a supprimé le mécanisme qui sert à amener les prismes au minimum de déviation.

Nous venons de nommer les prismes à vision directe; ces instruments sont très-utiles dans l'analyse spectrale. Ils ont été inventés par M. Amici, de Modène, et perfectionnés ensuite par M. Hofmann, de Paris. C, C, C (*fig.* 88) sont trois prismes de crown à peu près rectangulaires, soudés à deux autres de flint F, F également rectangulaires. Les prismes achromatiques ont la propriété de dévier les rayons lumineux sans leur faire subir de dispersion; le système que nous venons de décrire produit l'effet contraire, il les disperse sans les dévier. Ces

appareils sont excellents, et l'on parvient à obtenir, en les employant, une dispersion double de celle que produisent les instruments ordinaires. M. Hofmann construit d'excellents spectroscopes avec un seul prisme à vision directe; MM. Merz et Tauber ont obtenu une dispersion exceptionnelle en les combinant deux à deux.

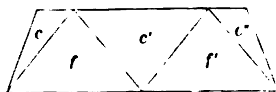
La *fig.* 89 représente le spectroscope à vision directe de

Fig. 89.



M. Merz; *ab* est le collimateur; *bc* l'ensemble des deux prismes, *cd* la lunette. La fente *f* est munie d'un bouton à tête divisée pour mesurer l'ouverture de la fente, et l'oculaire

Fig. 90.



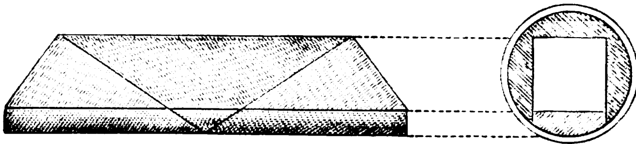
porte un petit micromètre pour mesurer les distances relatives des raies.

M. Rutherfurd, de New-York, a proposé un système de prismes composés qui n'est pas à vision directe, mais qui produit une dispersion équivalente à celle de trois prismes ordinaires. C, C', C'' (*fig.* 90) sont trois prismes de crown; en *f*, *f'* se trouvent deux prismes en flint lourd qui est très-dispersif. Le rayon sort de ce système fortement dispersé et légèrement dévié, de sorte que, avec un petit nombre de prismes,

on peut avoir une dispersion très-considérable ([1]). M. Hofmann construit actuellement des systèmes très-dispersifs composés de trois prismes seulement (*fig.* 91).

Cette dispersion ne peut cependant pas être indéfinie : l'intensité de la lumière se trouve assez affaiblie, surtout dans la partie plus réfrangible. L'épaisseur du verre à traverser devient bientôt très-considérable, surtout quand on emploie les prismes à vision directe. Chaque système présente à ce point de vue des inconvénients particuliers; dans les spectroscopes ordinaires, il y a de nombreuses réflexions sur les faces et, ces réflexions se produisant sous des angles assez grands,

Fig. 91.



la lumière transmise se trouve considérablement affaiblie. Les réflexions sont moins nombreuses dans les prismes à vision directe; mais, en revanche, l'épaisseur est plus considérable, ce qui fait compensation. Nous ne saurions dire d'une manière générale quel est le meilleur système; car il est probable, ici comme toujours, que le même instrument ne saurait servir à toutes les recherches. A mesure que l'occasion s'en présentera nous indiquerons les avantages que présente chaque combinaison.

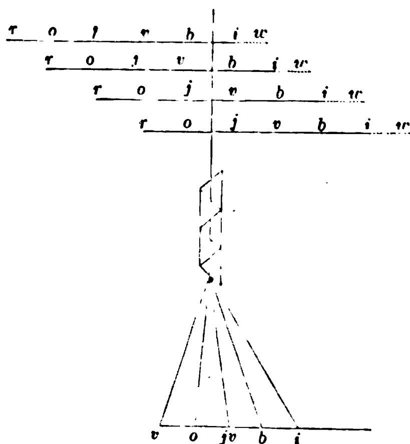
Avec des prismes convenablement disposés, on peut faire un excellent hélioscope. Devant la fente d'un spectroscope ordinaire, à une distance de 20 à 25 centimètres, on place un prisme à vision directe, qui intercepte le faisceau des rayons

---

([1]) Pour plus de détails, voir *Monthly Notices of Astronomical Society*. London.

solaires, et produit sur la fente un spectre confus. En observant ce spectre avec le spectroscope ordinaire à fente étroite, on voit une image du Soleil très-nette, colorée des couleurs du spectre, présentant les images du bord, des taches et des facules exactement comme on les voit avec un verre coloré. Si l'on place le bord du disque solaire près de la raie C de l'hydrogène ou de toute autre raie de la chromosphère, on voit

Fig. 92.



les raies brillantes, à l'extérieur du disque, dans la partie qui appartient à la chromosphère et aux protubérances. On peut mesurer la hauteur de celles-ci par la distance du bord à laquelle se trouve la raie renversée. La théorie du phénomène est très-simple. Le spectre confus formé sur la fente (*fig.* 92) est composé de plusieurs spectres superposés et qui appartiennent à différents points du disque solaire. Le spectroscope qui reçoit ces spectres mélangés les sépare les uns des autres et les dispose dans l'ordre des points du disque solaire d'où ils émanent. De là l'image entière du Soleil dans le champ de la lunette et les détails qui sont d'au-

tant plus distincts que la fente est plus étroite. D'après nos observations, l'image du Soleil aperçue ainsi près de l'horizon est moins agitée et moins confuse que celle que l'on voit avec les verres colorés ordinaires. Comme ce moyen permet de distinguer les enveloppes solaires qui sont en dehors du disque d'avec le disque lui-même, on peut s'en servir pour déterminer les points précis où se produisent les éruptions; on pourra aussi l'utiliser dans l'étude des éclipses et du passage des planètes, pour observer la Lune et les planètes avant leur entrée sur le disque solaire.

§ III. — *Description du spectre solaire.*

La figure du spectre solaire que nous venons de donner, dans des proportions modestes, d'après Fraunhofer et Van der Willingen, n'était qu'un premier essai et comme le prélude des grands travaux qui devaient être exécutés dans cette science nouvelle et inépuisable. M. Kirchhoff est le premier qui ait donné un travail étendu et complet; son spectre, devenu classique, ne contient pas seulement les raies solaires : il y a ajouté un grand nombre de raies appartenant aux différents corps simples de la Chimie. Ce travail, publié d'abord à Berlin, puis à Londres, a été reproduit dans les *Annales de Chimie et de Physique;* il contient la partie la plus intéressante du spectre, depuis la lettre A jusqu'à la lettre G de Fraunhofer. Le groupe situé au delà de A y est coté 380 millimètres, et la lettre G correspond à 2900 millimètres; la longueur totale est donc $2^m,520$. M. Thalèn a continué jusqu'aux raies H, de sorte que, entre ces deux limites, le spectre embrasse une étendue de $3^m,370$. Ce travail monumental a été exécuté avec l'excellent spectroscope de Steinheil (*fig.* 82); mais pour les parties extrêmes on a dû se con-

tenter d'un plus petit nombre de prismes. La lunette spectrale portait un mécanisme muni d'un tracelet à l'aide duquel on pouvait tracer sur une planche la position des raies. On a pu ainsi examiner chaque raie et étudier les détails de sa structure; on les a classées d'après leur largeur et leur intensité, car toutes les lignes sont loin d'être semblables; outre qu'elles n'ont pas toutes la même largeur, on voit, en les étudiant attentivement, qu'elles ne sont pas toutes également noires; elles ont presque toutes des contours nettement terminés; mais il y en a qui ne présentent pas ce caractère et qui sont diffuses sur les bords. Il y a au contraire des raies lumineuses qui sont plus brillantes que les autres : on en voit un exemple frappant auprès du groupe du magnésium, au point qui correspond à la longueur d'onde 5165,5. On y voit une magnifique bande brillante très-étroite; il y en a aussi un grand nombre dans le violet. Certaines bandes qui, dans les instruments ordinaires, paraissent comme estompées, sont en réalité composées d'un grand nombre de lignes parfaitement distinctes, comme on le voit avec un spectroscope ayant un grand pouvoir dispersif; mais quelques-unes d'entre elles sont réellement diffuses sur les bords, et il est impossible de les décomposer, quelle que soit la puissance de l'instrument que l'on emploie. Nous pouvons citer comme exemple les raies du groupe B.

M. Kirchhoff a été aidé dans ce travail par M. Hofmann, car sa vue était trop affaiblie pour qu'il pût l'exécuter tout seul. Dans le tableau descriptif du spectre, dont nous donnerons bientôt un extrait, la largeur des lignes a été indiquée par les lettres *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, leur teinte plus ou moins noire par les chiffres 1, 2, 3, 4, 5, 6; mais il y a tant de variétés dans les raies, au point de vue de l'intensité, de la largeur et de la diffusion, qu'on ne réussira jamais à faire une

figure géométrique du spectre qui soit autre chose qu'une grossière ébauche, un véritable squelette. Le meilleur moyen qu'on puisse employer, c'est de le reproduire par la photographie, comme l'a fait M. Rutherfurd, de New-York, et tout dernièrement M. Draper. Nous reproduisons, en gravure sur cuivre, dans la *Pl. II*, la partie du spectre voisine de H, telle que l'a obtenue M. Draper par les procédés de la photolithographie.

Malheureusement ce procédé n'est applicable qu'à la partie du spectre qui contient des rayons chimiques depuis F jusqu'aux rayons ultra-violets; le rouge, le jaune et une partie du vert sont incapables de produire une impression suffisamment nette; mais nous espérons que la science surmontera cette difficulté, et l'on nous assure que M. Vogel y est déjà parvenu en mélangeant au collodion des substances rouges, par exemple de l'aniline.

En attendant, nous profiterons des travaux déjà faits et des descriptions optiques que nous ont légués d'infatigables observateurs; tout cela est suffisant pour les parties les plus pratiques et les plus intéressantes de la science.

Le travail de M. Kirchhoff, quel que fût d'ailleurs son mérite, avait deux défauts considérables. D'abord on s'est aperçu que son échelle n'était pas constante dans toute son étendue, car il est bien difficile que ses prismes aient toujours été disposés au minimum de déviation. De plus, l'échelle étant arbitraire, il était difficile d'en reconnaître la proportion et de l'appliquer à d'autres systèmes de prismes n'ayant pas la même nature. Les physiciens ont donc cherché à modifier ce travail déjà si remarquable, de manière à le rendre parfait, en adoptant une échelle invariable basée sur la longueur même des ondes lumineuses qui correspondent aux différents points du spectre. Un spectre tracé d'après ce principe serait absolument indépendant de la nature des prismes et de la manière

dont ils auraient été combinés; mais il y aurait un autre avantage très-considérable, c'est qu'il serait identique à celui qu'on obtient par interférence au moyen des réseaux.

C'est Fraunhofer qui apprit aux physiciens à obtenir de très-beaux spectres sans faire usage du prisme, en utilisant les phénomènes de diffraction. Lorsqu'on fait passer la lumière par une fente étroite, on obtient des franges brillantes, dont la découverte est due à Grimaldi; ces franges deviennent beaucoup plus larges et plus distinctes lorsqu'on emploie une série de fentes parallèles. Fraunhofer obtint d'abord ces fentes en traçant, au diamant, une série de raies parallèles et très-serrées sur des plaques de verre doré : c'est ce qu'il appela des *réseaux*. Puis il reconnut que la couche d'or était inutile et qu'on arrivait au même résultat en traçant les raies sur le verre lui-même. Pour obtenir les spectres de diffraction, on vise avec une bonne lunette une fente très-éloignée ou bien son image placée au foyer d'un collimateur, puis on interpose la plaque de verre rayée sur le trajet des rayons; on peut aussi recevoir dans la lunette la lumière réfléchie sur la surface rayée, surface qui alors peut être métallique. Dans les deux cas, au lieu des franges de diffraction, on voit une série de spectres dans lesquels on peut distinguer les raies, comme dans celui qu'on obtient avec le prisme.

Il y a cependant une différence entre les spectres de diffraction et celui de réfraction. Ce dernier est déformé : le rouge et les rayons moins réfrangibles sont condensés ; le violet et les rayons plus réfrangibles sont dilatés outre mesure. Les réseaux donnent, soit par réflexion, soit par transmission, des spectres où la déviation est précisément proportionnelle à la longueur d'onde, plus étalés du côté du rouge, plus contractés du côté du violet que les spectres dus à la réfraction à travers les prismes.

Ces spectres de diffraction, bien connus des physiciens, n'avaient jamais été employés par les astronomes, à cause de la difficulté qu'il y avait à se procurer des réseaux assez grands et assez régulièrement construits. Cette difficulté vient d'être surmontée : M. Rutherfurd, à la fois savant distingué et artiste habile, a réussi à graver non-seulement sur verre, mais aussi sur le métal des miroirs, des réseaux ayant une surface d'environ 1 pouce carré, et contenant 4000 lignes parfaitement égales et rigoureusement parallèles. Nous devons à la générosité de M. Rutherfurd deux de ces précieuses plaques, dont la structure est irréprochable : l'une est en verre et l'autre en métal.

Les rayons réfléchis sur les réseaux métalliques donnent des spectres magnifiques. Le spectre de premier ordre est très-vif et équivaut au moins à celui qu'on obtient avec deux bons prismes de flint. Celui du second ordre est double en étendue; celui du troisième ordre est triple, et il équivaut au spectre obtenu à l'aide de six prismes. Malheureusement il est difficile de dépasser le second ordre, car au delà les spectres se superposent en partie, les couleurs et les raies se confondent. Le violet du premier ordre et le rouge du second se mélangent déjà, et il faut, pour les séparer, se servir de verres colorés. Dans les spectres d'ordre plus élevé, il se produit un phénomène curieux : on peut avoir dans un même champ très-étroit deux lignes très-éloignées l'une de l'autre, par exemple C et F, ces deux raies appartenant toutefois à deux spectres différents superposés; cette particularité peut être très-utile en certains cas.

A part les inconvénients résultant de cette superposition, les spectres ainsi obtenus sont excellents pour l'observation des protubérances solaires; ils sont aussi très-avantageux toutes les fois qu'on veut employer les procédés photogra-

phiques, parce que les rayons chimiques ne sont pas absorbés par cette réflexion comme ils le sont par le passage à travers les prismes.

Dans plusieurs circonstances, nous avons employé cette méthode pour l'observation du Soleil, et nous en avons reconnu les avantages; mais il y a une difficulté qui empêchera toujours d'en faire un usage habituel : c'est l'oxydation du miroir; aussi, malgré le poids des prismes et l'absorption qu'ils produisent, on les emploiera toujours de préférence aux réseaux métalliques. Quant aux réseaux sur cristal, ils n'ont pas un assez grand pouvoir réflecteur.

Il y a de si grands avantages à employer un spectre construit d'après les longueurs d'onde, que nous avons pris le parti de reproduire dans cet Ouvrage les planches du *spectre normal* que M. Angström a exécuté le premier. Ce savant a commencé par reconnaître les principales raies de Kirchhoff en déterminant la longueur d'onde qui correspond à chacune d'elles; puis il les a disposées dans les Tables dans l'ordre qui correspond à ces longueurs. C'est ce travail que nous reproduisons dans les quatre *Pl. III, IV, V* et *VI*. L'usage en est facile, et elles ne demandent aucune explication. Les chiffres qu'on lit sur l'échelle représentent les longueurs d'onde; chaque division a 1 millimètre de longueur et correspond à un dix-millionième de millimètre de longueur d'onde. Comme on peut estimer le dixième de chaque division, on parvient à évaluer les cent-millionièmes de millimètre, ce qui donne une idée de la perfection des mesures micrométriques actuellement employées dans ces recherches.

Le spectre de M. Angström s'arrêtant aux raies H, nous avons emprunté la suite au travail de M. Cornu, jusqu'aux rayons chimiques dont la longueur d'onde est 3795 dix-millionièmes de millimètre.

Quant aux raies qui appartiennent aux différentes substances, elles sont indiquées à la partie inférieure d'après la méthode adoptée déjà par M. Kirchhoff. Les raies multiples qui appartiennent à un même corps simple sont reliées par une ligne droite horizontale, sous laquelle on a écrit en abrégé le nom de ce corps. Le fer ayant un très-grand nombre de raies, on lui a donné une zone à part, à l'extrémité de laquelle se trouve son nom, Fe. Les autres substances ont été placées au-dessous; leurs raies sont indiquées par des lignes verticales en traits pleins, qui se continuent en traits ponctués à travers la zone du fer jusqu'à la bande spectrale, afin de faire voir la coïncidence lorsqu'elle a lieu. Les raies dues à l'absorption de notre atmosphère, et qui présentent un aspect diffus lorsque le Soleil est près de l'horizon, ont été estompées sur une hauteur plus ou moins considérable, suivant leur largeur et leur intensité. Celles qui sont propres aux éléments de l'air sont tracées dans une zone spéciale précédées de ce mot : *Aer*.

Cette figure ne présente qu'un seul inconvénient, et nous l'avons déjà signalé, c'est que l'échelle de séparation des raies est différente d'un bout à l'autre de la figure, si on la compare au spectre de réfraction : dans le rouge elles sont plus espacées; elles sont au contraire plus rapprochées dans le violet. Mais, dans la pratique, cet inconvénient disparaît, car dans le champ d'un appareil puissant on ne voit à la fois qu'une portion très-bornée du spectre, et il suffit de s'orienter sur quelqu'une des lignes fondamentales pour se rendre compte de l'étendue relative de l'espace qui sépare les différentes raies.

Pour faciliter au lecteur qui posséderait les planches de Kirchhoff la comparaison avec le spectre normal, nous reproduisons la Table suivante, où les nombres de la figure de Kirchhoff sont mis en regard des longueurs d'ondes données

par les deux savants éminents, MM. Van der Willingen et Angström. On a conservé, d'après Kirchhoff, les noms des substances auxquelles appartiennent différentes lignes, avec les indications d'intensité et de largeur. On pourra, pour avoir de plus amples renseignements, consulter le travail de Van der Willingen (Musée Teyler, vol. I, fasc. II, p. 59) et le spectre normal de M. Angström dans les *Actes de la Société d'Upsal*, 3e série, t. VI.

Pour l'explication de la dernière colonne de notre tableau nous renvoyons le lecteur au Chapitre suivant, dans lequel nous exposerons la théorie des spectres lumineux et la coïncidence des raies brillantes qui caractérisent certains corps avec des raies noires du spectre solaire.



Tableau des longueurs d'onde relatives aux raies principales du spectre solaire, d'après les mesures de M. **Van der Willingen**, *comparées avec celles de* MM. **Angström** *et* **Kirchhoff**.

LETTRES de Fraunhofer.	NOMBRES et lettres de Van der Willingen.	LONGUEURS D'ONDE, en millionièmes de millimètre		NOMBRES de la figure de M. Kirchhoff	INTENSITÉ et largeur selon le même.	SUBSTANCES correspondantes.
		selon V. d. W.	selon Angström.			
	1 α	763,36	"	"	"	
A	1 β	760,92	761,2	404,1	6	Diffuse aux bords.
	2 α	728,13	"	"	"	
	2 β	724,38	"	"	"	
	3 α	718,97	"	"	"	
	3 β	718,86	"	"	"	
B	4 α	687,48	687,5	592,6	6 *c*	Diffuse aux bords.
	4 β	687,12	"	"	"	
C	5	656,56	656,8	694,1	6 *c*	Hydrogène.
	6	651,94	"	711,5	"	
	7	649,77	"	719,5	"	
	8 α	628,11	"	"	"	
	8 β	628,00	"	"	"	
	...	625,90	"	"	"	Atmosphérique. Très-forte. Cᵉ de Brewster.
	9	619,45	619,2	849,7	3 *c*	Fer.
	10	616,49	616,3	863,9	5 *b*	Calcium.
	...	"	614,3	874,3	4 *b*	Baryum.
	11	613,96	613,9	877,0	4 *c*	Fer.
	12	612,52	612,4	884,9	4 *b*	Calcium, cobalt.
	13	610,52	610,5	894,9	2 *c*	Calcium.
D_1	14 α	589,86	590,0	1002,8	6 *b*	Sodium.
D_2	14 γ	589,26	589,4	1006,8	6 *b*	
	15	562,70	"	1200,4	"	
	16	561,80	561,80	1207,3	5 *g*	Fer.
	17	553,19	"	1280,0?	"	
	18	547,86	"	1324,0?	"	
	19	545,83	546,0	1343,5	6 *c*	Fer.
	20	537,38	537,4	1421,6?	5 *b*	Fer.
	21	533,05	533,2	1463,0	5 *c*	Fer. Double.
E	22 α	527,24	527,4	1522,7	6 *c*	Fer. Calcium.
	22 β	527,04	527,3	1523,7	6 *c*	Fer.
	23	523,50	523,7	1569,6	5 *c*	Fer.
	24	522,96	"	1577,5	"	
	25	518,63	518,8	1634,1	6 *g*	Magnésium.

Tableau des longueurs d'onde relatives aux raies principales du spectre solaire, d'après les mesures de M. Van der Willingen, *comparées avec celles de* MM. Angström *et* Kirchhoff. (Suite.)

LETTRES de Fraunhofer.	NOMBRES et lettres de Van der Willingen.	LONGUEURS D'ONDE, en millionièmes de millimètre. selon V. d. W.	selon Angström.	NOMBRES de la figure de M. Kirchhoff	INTENSITÉ et largeur selon le même.	SUBSTANCES correspondantes.
b	26	517,51	517,7	1648,8	6 *f*	Magnésium.
	27 α	517,14	517,3	1653,7	6 *b*	Fer. Nickel. Diffuse aux bords.
	27 β	517,07	517,2	1655,6	6 *c*	Fer, magnésium. Diffuse aux bords.
	27 γ	516,96	"	"	"	
	28	510,18	"	1750,4?	"	
	29	508,27	"	1777,4?	"	
	30	504,37	"	1834 ?	"	
	31	496,01	496,1	1961,0	4	Fer.
	32	489,38	489,5	2041,4	6 *b*	Fer. Double.
	33	487,46	487,4	2066,6	5 *c*	Fer. Double.
F	34	486,39	486,5	2080,0	6 *g*	Hydrogène.
	35	467,00	"	2309	"	
	36 α	453,75	"	2489,4?	"	
	36 β	453,39	"	"	"	
	36 γ	453,06	"	"	"	
	37	438,58	438,6	2721,6	6	Fer. Très-large.
	38	434,28	434,3	2798,6	6	Hydrogène. Diffuse, large.
	39	432,74	432,8	2821,9	6	Fer
G	40	431,12	431,0	2854,4	6	Fer.
	41	427,52	427,5	"	"	Fer.
	42	426,27	426,2	"	"	Fer.
	43	422,87	422,9	"	"	Calcium. Double.
	44	414,55	414,7	"	"	Double.
	45	413,51	"	"	"	
	46	410,38	410,4	"	"	Hydrogène. La 5e. dans les étoiles du 1er type.
	47	407,95	407,5	"	"	Fer. Forte.
	48	406,75	406,6	"	"	Fer. Forte.
	49	404,79	404,8	"	"	Fer. Forte.
	50	403,61	"	"	"	
H_1	51 α	397,13	397,2	"	"	Calcium.
H_2	56 β	393,76	393,6	"	"	Calcium.

CHAPITRE III.

THÉORIE GÉNÉRALE DES SPECTRES LUMINEUX.

§ I. — *Comparaison de la lumière solaire avec les autres lumières.*

Le seul moyen d'arriver à connaître la nature et la cause des raies noires que nous observons dans le spectre du Soleil, c'est d'étudier à ce même point de vue les autres lumières, soit naturelles, soit artificielles. Cette étude est facile et elle avait été déjà commencée par plusieurs savants. Fraunhofer avait examiné le spectre dû à la flamme de l'alcool salé, et il avait reconnu qu'il est seulement composé d'une double ligne jaune qui correspond au groupe des raies D du spectre solaire. John Herschel, Fox Talbot et Brewster étudièrent différentes flammes; ils trouvèrent que leurs spectres étaient discontinus, formés de plusieurs raies séparées et indépendantes, mais constantes pour une même substance : aussi Brewster affirma-t-il qu'on peut reconnaître la nature des corps par la simple inspection du spectre auquel ils donnent naissance. Nous avions nous-même étudié le spectre de l'étincelle électrique, ainsi que Wheatstone, Masson, Brewster, mais tous ces travaux étaient épars et sans unité; il fallait les coordonner entre eux, en comparant les différents spectres avec celui de la lumière solaire. C'est là

le travail qui a été accompli par MM. Bunsen et Kirchhoff d'abord, puis par Hofman et Thalèn. Cette comparaison n'exige pas d'autre appareil que le spectroscope dont nous avons déjà parlé : il suffit de mettre la source lumineuse qu'on veut étudier en avant de la fente du collimateur, en adoptant un procédé quelconque qui permette d'introduire à la fois dans l'appareil les rayons émanés de cette source et ceux de la lumière solaire. Pour cela on dispose un petit prisme devant la fente, de manière à la couvrir dans une moitié de sa longueur; les faces de ce prisme réfléchissent la lumière dont on veut faire l'analyse, de manière à la diriger dans le tube de la lunette, parallèlement à son axe; en même temps, un rayon de lumière solaire pénètre par la partie de la fente demeurée libre. Alors on voit dans le champ de l'appareil deux spectres distincts, mais juxtaposés : l'un produit par la flamme qu'on étudie, l'autre dû au rayon solaire. Comme les deux parties de la fente composent une seule et même ligne droite, les raies qui ont même indice de réfraction doivent occuper des positions identiques dans les deux spectres, et, par suite, elles doivent être rigoureusement sur le prolongement l'une de l'autre. Lorsqu'on a besoin d'une plus grande précision, on fait arriver les deux lumières directement par la même fente, et on les superpose ainsi parfaitement. On ne peut pas toujours employer cette méthode; mais, lorsqu'on parvient à voir ainsi les deux spectres à la fois, elle est de beaucoup préférable à la précédente.

En opérant ainsi, on est arrivé aux conclusions suivantes :

1° Lorsqu'on examine des corps simplement incandescents, comme les charbons de l'arc voltaïque, un fil de platine traversé par un courant électrique, la chaux, la magnésie, la zircone échauffées par la flamme du gaz oxy-hydrogène, le charbon en suspension dans la flamme d'une lampe ou dans

celle d'une bougie, etc., on obtient toujours un spectre continu, sans aucune raie noire ou brillante.

2° Toutes les fois qu'un corps, brûlant à la pression ordinaire, donne naissance à un composé gazeux, il produit une flamme dont le spectre est discontinu : ainsi la flamme d'une bougie présente, dans la partie plus lumineuse, un spectre continu; mais il y a toujours à sa base une partie bleuâtre, dans laquelle s'effectue la combinaison du carbone et de l'oxygène; cette partie donne un spectre discontinu, où l'on distingue trois groupes de raies vertes et bleues, nettement séparées les unes des autres et brillant d'un vif éclat. Ces raies

Fig. 93.

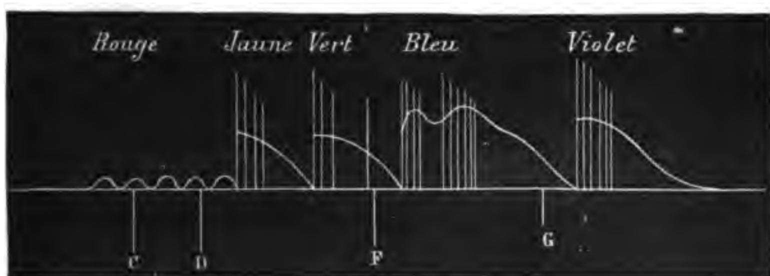


sont dues soit au carbone, soit à l'un de ses composés, et leur ensemble forme une échelle excellente pour l'étude de certaines lumières. Ce spectre est représenté dans la *fig.* 93, où la hauteur des lignes verticales est proportionnelle à l'intensité des raies correspondantes.

On peut encore obtenir les raies principales de ce spectre en examinant au spectroscope la flamme du cyanogène ou celle d'un autre composé du carbone. On les voit encore très-nettes dans le milieu de l'arc bleuâtre qui se produit entre les deux charbons, lorsqu'on fait l'expérience de la lumière électrique avec une forte pile. Ainsi, pendant que les charbons, qui sont simplement incandescents, donnent un spectre continu, l'arc voltaïque donne le spectre représenté dans la *fig.* 94, où les raies brillantes sont accompagnées de bandes estom-

pées en forme de cannelures. De plus, les deux pôles donnent des spectres différents l'un de l'autre. Il y a donc, dans ce petit intervalle, trois spectres distincts. Pour les étudier séparément, il faut, à l'aide d'une lentille convergente, projeter sur la fente du spectroscope l'image de l'arc voltaïque; si l'on ne prend pas cette précaution, le prisme recevra à la fois les rayons de toute nature venant des deux charbons et de l'intervalle qui les sépare; on aura alors un spectre à peu près continu.

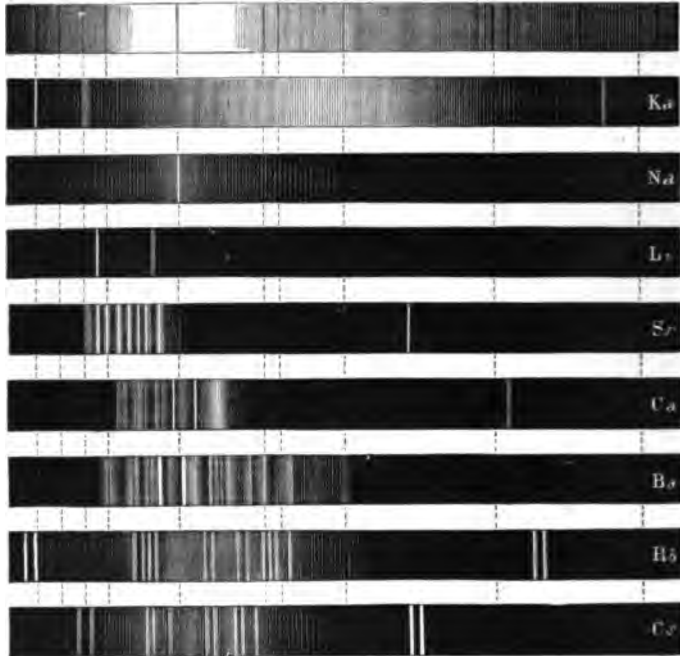
Fig. 94.



On peut employer plusieurs méthodes pour étudier les raies que produisent les métaux dans leur combustion; on peut les brûler en les introduisant dans une flamme assez chaude; on peut encore brûler un de leurs sels, comme on fait dans les feux d'artifice; on peut enfin recourir aux étincelles électriques. Lorsqu'on brûle dans une lampe une dissolution alcoolique de sel marin, on obtient d'une manière très-remarquable la raie jaune du sodium, qu'on peut séparer en deux avec des instruments un peu puissants. Le chlorure de cuivre, l'azotate de strontiane, le carbonate de lithine introduits dans la mèche de la lampe donnent des raies vertes et rouges qui servent à caractériser ces métaux. Les lampes à alcool ne produisent pas une température assez élevée pour les métaux plus réfractaires; on emploie alors

le bec de Bunsen, dans lequel on brûle un mélange de gaz d'éclairage et d'air atmosphérique. On obtient ainsi une flamme bleue dont la température est très-élevée, et qui ne donne pas le spectre continu de la flamme blanche ordinaire.

Fig. 95.



Lorsqu'on veut utiliser l'étincelle électrique, on a recours, soit à une forte pile, soit à une bobine d'induction, et l'on fait jaillir l'étincelle entre deux rhéophores composés des métaux qu'on veut étudier.

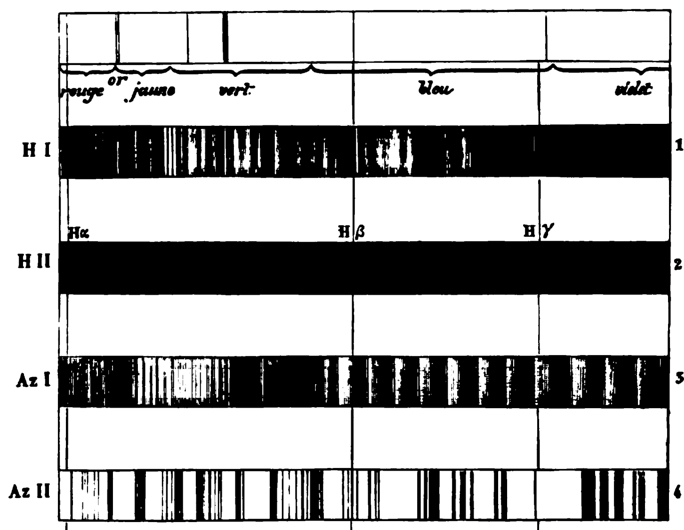
Dans ces circonstances, pendant que la combustion ou la combinaison chimique s'effectue, *une même substance donne toujours les mêmes raies lorsqu'elle se trouve à la même température*. La *fig.* 95 fait voir les raies principales qui se déve-

loppent en brûlant des métaux alcalins : potassium (K), sodium (Na), lithium (Li), strontium (Sr), calcium (Ca), baryum (Ba), rubidium (Rb), cæsium (Cs).

3° Si l'on fait varier la température ou le degré de combustion pour les corps composés, on obtient des spectres très-différents les uns des autres. Lorsqu'il s'agit des gaz, la pression à laquelle ils se trouvent au moment de la combustion exerce une très-grande influence : quelques-uns de ceux qui donnent des raies nettes, à une faible pression, donnent des spectres continus lorsqu'ils sont soumis à une pression très-considérable, résultat qu'on attribue à une température plus élevée. On essaye généralement les gaz en les amenant à un degré suffisant de raréfaction dans des tubes fermés connus sous le nom de *tubes de Geissler,* dans lesquels on fait passer la décharge d'une bobine d'induction. On remarque alors que la plupart d'entre eux donnent des spectres différents, suivant la tension de la décharge : ainsi l'azote donne un magnifique spectre cannelé lorsqu'on fait passer une étincelle ayant une tension assez faible (*fig.* 96, Az I, n° 3); mais, lorsqu'on introduit un condensateur dans le circuit et que la tension de la décharge devient très-grande, alors le spectre est discontinu et composé de raies isolées, dont l'aspect est très-différent du précédent (Plücker, *fig.* 96, Az II, n° 4). La même chose arrive pour l'oxygène, le carbone, le soufre, etc. Dans ces expériences, les gaz agissent à peu près comme des vapeurs métalliques; mais, en général, leur spectre est très-complexe : ainsi l'hydrogène donne quatre raies principales, une dans le rouge, la deuxième dans le bleu, et deux autres dans le violet; il présente en même temps un grand nombre de lignes plus faibles, dont l'intensité varie à mesure que la tension devient plus forte (*fig.* 96, H I, n° 1). Si la température s'élève d'une manière suffisante, les bandes diffuses disparaissent et

il ne reste que les quatre raies principales (*fig.* 96, H II, n° 2) (¹). Mais lorsque la pression est plus élevée, les raies vives indiquées ci-dessus s'étalent et deviennent des bandes (Wüllner), et enfin on finit par avoir des spectres continus sous de très-fortes pressions (Frankland). Ce fait avait été annoncé par M. Frankland, qui l'avait observé en examinant

Fig. 96.



le spectre dû à l'explosion d'un mélange d'oxygène et d'hydrogène, mais il a été mis hors de doute par les expériences de M. Cailletet, faites sous une pression de 50 atmosphères. Alors le spectre de l'azote et celui de l'hydrogène deviennent brillants et continus. On ne peut pousser plus loin les pressions, car le verre devenant conducteur de l'électricité, à cause de sa haute température, la lumière disparaît subitement. On ne passe pas brusquement d'un spectre linéaire à

(¹) La quatrième raie n'est pas représentée dans la figure.

un spectre continu : on voit d'abord les raies peu lumineuses à la pression ordinaire s'élargir et se dilater progressivement; à 15 atmosphères elles paraissent estompées; à mesure qu'on augmente la pression, elles s'étendent davantage et finissent par remplir complétement les intervalles qui les séparaient : alors le spectre est continu, et, même avec une étincelle d'un tiers de millimètre, la lumière est assez vive pour éclairer un vaste laboratoire. (Cailletet.)

On a beaucoup discuté sur l'origine des spectres multiples des gaz : quelques savants pensent que chaque gaz possède réellement des spectres différents, suivant les circonstances; d'autres pensent qu'il faut attribuer ces différences à des impuretés sans lesquelles chaque substance aurait un spectre unique. On s'est demandé si les changements que présente le spectre tiennent à la différence de pression ou bien seulement à la variation de la température. Cette dernière cause semble avoir la principale influence, l'accroissement de pression n'ayant d'autre effet que d'exiger une température plus élevée. Lorsqu'on fait passer la décharge de la bobine dans un tube qui n'a pas partout le même diamètre, on observe dans la partie la plus large un spectre à bandes, tandis que la partie étroite donne un spectre linéaire. Les phénomènes que nous venons de signaler sont très-importants; nous nous contentons d'en exposer brièvement les lois. Les physiciens ne sont pas tous d'accord dans la solution de ces questions; mais il paraît que l'opinion qui admet la possibilité des spectres multiples pour une même substance, selon la température, gagne du terrain.

4° La plupart des métaux donnent des spectres discontinus composés de quelques raies brillantes qui séparent de larges bandes obscures. Ces spectres ont donc une composition inverse de celle du spectre solaire, dans lequel domine

la partie lumineuse. Il y a cependant quelques substances qui donnent un spectre composé d'un grand nombre de raies brillantes, le fer par exemple, surtout quand on le soumet à l'action d'une forte pile de Bunsen. En employant, comme l'ont également fait MM. Angström et Thalèn, une pile de cinquante éléments, nous avons compté jusqu'à cinq cents raies. M. Thalèn en a compté deux cents dans le spectre du titane. Quelques métaux semblent, au premier abord, donner un spectre continu, dans lequel on remarque quelques raies plus brillantes : c'est ce qui arrive lorsqu'on brûle du magnésium. Dans ce cas le spectre continu provient de l'oxyde qui se forme et qui, porté par la combustion à une température élevée, se comporte comme un corps simplement incandescent, émettant des rayons de toute nature.

M. Cailletet a reconnu que, sous de fortes pressions, les raies des métaux deviennent diffuses et estompées, comme celles des gaz, et ils donneraient sans doute des spectres continus si l'on pouvait obtenir des pressions assez fortes, combinées avec de très-hautes températures. Lorsqu'on brûle du sodium en grande quantité dans l'arc voltaïque, on voit ses raies se dilater d'une manière très-remarquable : il semble donc que la largeur des raies peut dépendre, non-seulement de la pression, mais aussi de l'épaisseur plus ou moins grande de la couche de vapeur.

Lorsqu'on étudie les spectres des métaux avec l'étincelle d'induction, il faut bien se garder d'attribuer au métal toutes les raies qu'on observe. Un grand nombre d'entre elles appartient à l'air atmosphérique ou au gaz dans lequel se fait l'expérience ; ces raies du gaz domineront dans le spectre si l'étincelle est courte et environnée d'une auréole : elles diminuent au contraire lorsque l'étincelle acquiert une longueur suffisante.

5° Le résultat le plus surprenant, c'est celui qu'on obtient en juxtaposant, comme nous l'avons indiqué, le spectre du Soleil et celui d'un métal. On trouve que, pour un bon nombre de substances, les raies brillantes correspondent exactement à certaines raies noires du spectre solaire : ainsi les raies caractéristiques du sodium coïncident d'une manière précise avec les raies D de Fraunhofer; les raies que l'hydrogène produit dans le rouge, dans le bleu et dans le violet, coïncident avec les raies C et F, et avec la trente-huitième et la quarante-sixième de Van der Willingen (*voir* le tableau qui se trouve à la fin du Chapitre précédent). Les raies du fer correspondent également à des raies bien déterminées de la lumière solaire. M. Kirchhoff a trouvé plus de soixante coïncidences; Angström en a trouvé jusqu'à quatre cent quatre-vingt-dix et plus. Dans le tableau que nous avons inséré à la fin du Chapitre précédent, nous avons indiqué le nom des substances dont les raies correspondent à celles du Soleil; mais notre tableau est incomplet, et nous aurions pu ajouter un grand nombre de métaux dont le nom n'y figure pas; mais notre intention n'est pas de donner un traité complet de spectroscopie.

On aura des indications plus complètes en étudiant la figure spectrale de M. Kirchhoff dans les quatre planches reproduites dans les *Annales de Chimie et de Physique* (3e série, tome LXVIII, mai 1863, et 4e série, tome I, avril 1864) : les parties inférieures des échelles partielles représentent les raies métalliques qui correspondent à des raies noires du spectre solaire. Nous reproduisons, d'après M. Angström, la liste des raies dont on a ainsi constaté la coïncidence :

Hydrogène..................	4
Sodium.....................	9
Baryum.....................	11

Calcium	75
Magnésium	4 + (3?)
Aluminium	2 (?)
Fer	490
Manganèse	57
Chrome	18
Cobalt	19
Nickel	33
Zinc	2
Cuivre	7
Titane	200

Nous pouvons ajouter quelques noms à cette liste : M. Lockyer a dernièrement reconnu dans le Soleil la présence du strontium, du cadmium, du plomb, du cérium, de l'uranium; on y trouve donc tous les métaux appartenant au même groupe que le fer. M. Lockyer a cherché inutilement les métaux dont les oxydes se décomposent facilement : l'or, l'argent, le mercure, etc. Il n'a pas trouvé non plus le chlore, le brome, l'iode, etc. Nous avions déjà reconnu la présence du plomb.

§ II. — *Spectres d'absorption.*

La coïncidence des raies noires du spectre solaire avec les lignes brillantes de quelques spectres métalliques était trop extraordinaire pour ne pas exciter vivement l'attention des physiciens; mais, quoique cette coïncidence, au moins pour le sodium, fût connue depuis le temps de Fraunhofer, on n'avait encore trouvé aucune explication satisfaisante. Foucault avait remarqué une singularité que présente la combustion du sodium dans l'arc voltaïque. Ce métal donne d'ordinaire une ligne brillante correspondant à la raie D; mais, lorsqu'on le brûle en grande quantité, on voit, dans certaines

circonstances, apparaître un spectre plus étendu et à peu près continu, dans lequel la ligne jaune est remplacée par une raie noire. Ce fait resta isolé et inexpliqué jusqu'au moment où Kirchhoff le rattacha à sa théorie générale. Cette ligne noire est produite, selon lui, par l'absorption qu'exerce la vapeur du sodium environnant le point lumineux.

Voici une expérience très-simple qui met bien en évidence

Fig. 97.



l'absorption produite par la vapeur de sodium. On prend deux lampes dans lesquelles on fait brûler une dissolution alcoolique de sel marin, et on les dispose de manière à ce que, pour l'observateur, elles se projettent en partie l'une sur l'autre, comme l'indique la *fig.* 97. On verra que, dans la

Fig. 98.



région où les deux flammes se superposent, celle de derrière paraît noire et fuligineuse : cet effet est dû à ce que les rayons émis par la flamme placée en arrière sont absorbés et arrêtés au passage par la vapeur qui se trouve dans la flamme placée en avant.

Lorsqu'on brûle une quantité considérable de sodium, on obtient, à la place des lignes brillantes, des raies noires bien prononcées et sensiblement dilatées (*fig.* 98). Ce phénomène

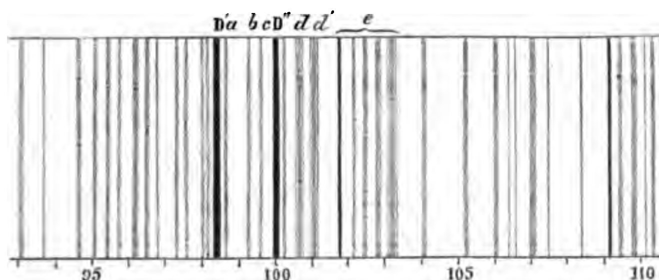
s'explique également par l'absorption que produisent les vapeurs métalliques sur les rayons lumineux émis par la flamme. Ce renversement des raies du sodium présente une circonstance bien importante : l'absorption des rayons lumineux s'étend de part et d'autre à une grande distance, et les raies, tout en restant distinctes et nettement tranchées à l'intérieur, se dilatent sur leurs bords extérieurs comme de véritables bandes. Cette dilatation des raies noires se produit dans les mêmes circonstances que celle des raies brillantes; l'étendue occupée par ces bandes sombres est proportionnelle à la largeur que présenteraient les raies D s'il n'y avait pas renversement. Il paraît donc que le sodium peut, dans certaines circonstances, donner de larges bandes à la place des lignes nettement tranchées qu'on observe ordinairement. Le thallium et quelques autres métaux présentent des phénomènes semblables.

On connaissait depuis longtemps des exemples d'absorption produite par des vapeurs. Par exemple, lorsque la lumière solaire a traversé une couche d'acide hypoazotique ou de vapeur d'iode, elle donne des raies qui n'existaient pas auparavant. Ce fait s'observe également lorsqu'on regarde à travers ces gaz une flamme ordinaire dont le spectre est continu; les raies dues à l'absorption s'y produisent également, et il est bien plus facile de les reconnaître.

Les gaz qui composent notre atmosphère ont aussi une puissance d'absorption assez considérable; ils peuvent donc, en faisant disparaître certains rayons lumineux, donner naissance à quelques-unes des raies qu'on observe dans le spectre. Cette absorption atmosphérique étant d'autant plus grande que la lumière traverse une couche plus épaisse, le spectre doit varier avec la position du Soleil; les raies doivent être moins nombreuses lorsqu'il est près du zénith, plus

abondantes lorsqu'il est près de l'horizon. Il est facile d'observer cette différence avec un simple prisme ou avec un spectroscope de poche de Hoffmann. La *fig*. 1, *Pl. I*, due à M. Janssen, donne une idée de ces variations pour la partie la moins réfrangible du spectre. Dans le rouge extrême, on voit se développer de larges bandes noires, qui n'existaient pas lorsque le Soleil était plus élevé. Dans l'orangé surtout, entre C et D, près de la raie 8 β de Van der Willingen, on voit se former une ligne nommée C^{δ} par Brewster (*fig*. 2, *Pl. I*),

Fig. 99.



suivie de plusieurs traits parallèles entre eux. Entre C^{δ} et D il se forme ordinairement un très-grand nombre de lignes, et quelques-unes de celles qui existaient déjà deviennent notablement plus larges. Dans les *Pl. III* à *VI* du spectre normal de M. Angström on a estompé les lignes qui sont influencées par l'absorption atmosphérique.

Nous reproduisons dans la *fig*. 99 le groupe de lignes atmosphériques, situées entre 94,3 et 103,2 de Kirchhoff, tel qu'on le voit avec un spectroscope à sept prismes lorsque le Soleil est auprès de l'horizon. Ces raies sont beaucoup plus marquées en été qu'en hiver; elles sont alors plus noires que la raie D, et l'ensemble de la partie sombre est plus étendu que la partie lumineuse qui forme le fond du spectre. Elles

sont aussi plus visibles lorsque l'air est brumeux et humide.

Au delà de D il se forme une grande bande nommée δ par Brewster. Pendant l'hiver, elle est composée de raies très-fines; mais en été elle devient très-sombre, et les différentes lignes qui la composent laissent à peine un intervalle entre elles. Enfin on remarque un autre groupe dans le vert, à peu près au milieu de l'intervalle qui sépare *b* et F; le violet en contient également un certain nombre.

Quelques-unes de ces raies sont dues, sans aucun doute, aux gaz qui composent notre atmosphère; les groupes du vert, en particulier, appartiennent à l'azote. Celles qui se trouvent dans le jaune et dans le rouge sont presque exclusivement dues à la vapeur d'eau. Nous l'avons constaté en examinant ces spectres, dans différentes circonstances atmosphériques, en notant le moment où les raies apparaissent à mesure que le Soleil s'abaisse en approchant de l'horizon, et enfin en analysant pendant la nuit la lumière émise par des flammes situées à une grande distance. De plus, nous avons vu ces mêmes raies se manifester au moment où des nuages légers passaient devant le disque du Soleil, ce qui montre l'influence de la vapeur d'eau qu'ils contiennent. M. Janssen a confirmé cette explication en examinant la flamme d'un gaz à travers un tube rempli de vapeur d'eau à haute pression. Il pourrait cependant se faire qu'un certain nombre de raies soient dues à des substances encore inconnues, qui sont répandues en assez grand nombre dans notre atmosphère, surtout dans la saison chaude, où elle est chargée de vapeurs d'origine végétale qui sont généralement très-absorbantes. La plupart, cependant, dépendent assurément de la vapeur d'eau, comme nous l'avons prouvé en faisant simultanément des études spectrales et des observations hygrométriques.

§ III. — *Renversement des spectres.*

Il résulte de l'exposition précédente qu'un spectre peut être discontinu pour deux raisons bien différentes : 1° parce que, en réalité, les rayons émis par la source lumineuse ne sont pas continus : telle est la lumière de l'étincelle électrique, celle des métaux volatilisés, etc.; 2° le spectre peut devenir discontinu par l'action absorbante d'une substance gazeuse ou d'une vapeur, et cette vapeur peut être celle de la substance brûlée. Les vapeurs métalliques étant très-absorbantes, comme nous l'avons vu pour le sodium, pourraient bien produire un résultat semblable dans la lumière solaire, et c'est de là que résulteraient les lignes noires du spectre. Cette idée si féconde se présente naturellement à l'esprit comme une conséquence de tout ce que nous venons de dire. Ajoutons cependant qu'il n'est pas nécessaire que les vapeurs soient incandescentes : il suffit que la température soit assez élevée pour réduire le métal à l'état de fluide élastique, température qui n'est pas la même pour toutes les substances. Ainsi Kirchhoff a pu constater l'absorption produite par le sodium avec des tubes pleins d'hydrogène qui contenaient la vapeur de ce métal à une température assez basse.

On peut reproduire cette expérience bien simplement, de la manière suivante : on dirige le spectroscope vers le Soleil, comme pour les observations ordinaires, puis on met devant la fente du collimateur la flamme d'une lampe dans laquelle on a mis une dissolution alcoolique de chlorure de sodium : on voit aussi les raies D devenir plus sombres et s'élargir considérablement, si la vapeur métallique est abondante. La flamme doit avoir des dimensions considérables. On réussira

17.

plus facilement si, au lieu d'employer de l'alcool salé, on pose sur la mèche un peu de sodium ou de carbonate de soude.

Lorsqu'on brûle dans l'arc voltaïque certains métaux, le sodium, le thallium, le magnésium, etc., les raies, qui sont brillantes lorsque la flamme est petite, deviennent noires au milieu et bordées d'une lumière très-vive, si la flamme devient plus brillante; de sorte que la ligne brillante paraît divisée en deux par une raie noire très-fine. C'est le renversement produit dans la région centrale par la petite atmosphère de vapeur métallique qui environne l'étincelle ([1]). Cette expérience, due à M. Cornu, est analogue à celle de Foucault dont nous avons parlé, et dans laquelle on analyse au spectroscope la lumière produite par la combustion d'une masse plus considérable de sodium. Nous l'avons vérifiée pour le sodium, le magnésium, le fer, le thallium, etc.

Toutes ces expériences supposent, comme condition essentielle, que la couche extérieure dans laquelle se produit l'absorption est à une température plus basse que la région d'où émanent les rayons. De là le principe fondamental de ces recherches : *A une basse température, une vapeur absorbe précisément les rayons lumineux que la même substance émettrait si elle était incandescente.* Ainsi la vapeur de sodium produit, par son absorption, des raies noires à l'endroit précis où le même métal produit des raies brillantes pendant sa combustion. Ce fait généralisé constitue ce qu'on appelle le *renversement du spectre*, et l'on peut énoncer d'une manière générale le principe suivant : *Une vapeur absorbe précisément les rayons qu'elle est capable d'émettre lorsqu'elle est incandescente ; de sorte que le pouvoir émissif et le pouvoir ab-*

([1]) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXXIII, p. 332.

sorbant sont complémentaires l'un de l'autre. Cette règle suppose toujours, comme condition essentielle, que la vapeur absorbante est à une température plus basse que celle du corps rayonnant.

La théorie physique de ces phénomènes est assez facile à établir par une simple comparaison entre l'optique et l'acoustique, comparaison à laquelle nous conduisent naturellement les idées actuelles, d'après lesquelles la lumière résulte des ondulations d'un fluide éthéré. Un grand nombre de corps sonores, à cause de leurs formes irrégulières, ne peuvent émettre que des bruits résultant d'une multitude de sons confus et correspondant à des longueurs d'onde différentes; il y en a d'autres, au contraire, qui, se trouvant dans de meilleures conditions, produisent des sons musicaux parfaitement définis et déterminés; ces sons musicaux sont produits par des vibrations toutes isochrones, et ils se propagent par des ondulations toutes de même longueur; ils sont tout au plus accompagnés de quelques harmoniques à la quinte, à l'octave, etc.

Il se produit quelque chose d'analogue pour les corps lumineux. Les corps simplement incandescents, retenus et gênés par des liens moléculaires, émettent des ondulations de toute nature et de toute longueur, dont les indices de réfraction prennent toutes les valeurs possibles entre deux limites extrêmes : de là résulte nécessairement un spectre continu. Les mêmes substances réduites en vapeur, délivrées des entraves de la cohésion, vibrent avec plus de liberté, émettent des ondes lumineuses dont la longueur dépend uniquement de la masse vibrante et de sa force vive. Ces ondes sont en petit nombre et nettement définies; tout au plus sont-elles accompagnées de quelques autres ondulations que nous pourrions appeler *harmoniques* et dont les longueurs ont des rapports

commensurables avec celle de l'onde principale. Par exemple, les raies C et F de l'hydrogène sont dues à des rayons dont les longueurs d'onde sont presque rigoureusement dans le rapport de 4 à 3, rapport qui caractérise en acoustique l'intervalle de l'*ut* au *fa;* la différence est seulement de $\frac{1}{81}$. La troisième raie du violet, comparée à la raie C, donne le rapport de $\frac{9}{8}$ à $\frac{5}{3}$, avec une différence également très-petite ; en faisant abstraction de cette différence, nous aurions le rapport qui caractérise l'intervalle du *ré* au *la*. Dans plusieurs substances, les raies spectrales sont réunies par groupes (fer, magnésium, carbone, etc.) ; or, d'après M. Hinrichs, si l'on étudie les différentes raies d'une même substance, on trouve que leurs longueurs d'onde peuvent être représentées par les termes d'une progression arithmétique, et la raison de cette progression demeure constante pour un même groupe ; elle peut toujours s'exprimer par un nombre assez simple, qui dépend de la forme et du volume des atomes. Ajoutons cependant que les vibrations d'un corps ne se réduisent ainsi à un petit nombre d'ondes régulières que jusqu'à une certaine limite de température et de pression ; au delà de ces limites, les ondes de longueurs différentes deviennent de plus en plus nombreuses, et l'on finit par avoir un spectre continu. C'est ce qui arrive pour l'hydrogène dans les expériences de Cailletet et de Plücker ; on en voit encore des exemples dans la combustion vive du sodium, du thallium, etc.

Ces théories peuvent présenter quelques difficultés de détail, mais on ne saurait contester le principe général qui en est le fondement : les molécules parfaitement libres d'un gaz doivent vibrer d'une manière simple et nettement définie, absolument comme les corps de forme et de masse déterminées qu'on emploie en acoustique pour produire des sons musicaux d'une très-grande pureté.

Il arrive souvent que certains corps sonores, susceptibles de rendre des sons musicaux bien déterminés, se mettent en vibration *par sympathie*. Il suffit pour cela que, dans le voisinage, un instrument quelconque fasse entendre le son que ce corps est capable de produire, ou même l'une de ses harmoniques. C'est ainsi que les cordes d'un piano, d'une harpe ou d'un violon peuvent, sans avoir été directement ébranlées, se mettre à résonner sous la seule influence des ondes aériennes. Lorsqu'on parle devant un piano ouvert, on entend frémir les cordes qui sont d'accord avec la voix. Les belles expériences de Meyer prouvent que ces vibrations se transmettent à des diapasons placés à des distances très-considérables et qu'on peut les rendre visibles par des moyens très-simples.

Les molécules d'un gaz doivent éprouver quelque chose de semblable, relativement à la lumière. Lorsqu'elles sont frappées par des ondes éthérées, ces molécules demeurent le plus souvent indifférentes, parce qu'elles ne sont pas capables de vibrer à l'unisson; mais, s'il survient un mouvement vibratoire correspondant à la longueur d'onde qu'elles peuvent elles-mêmes produire, ou ayant avec cette longueur un rapport assez simple, elles en subiront immédiatement l'influence, comme les cordes sonores subissent l'influence des vibrations aériennes. Mais alors les molécules ainsi ébranlées absorberont le travail de l'onde lumineuse qui les a frappées, et, le mouvement étant ainsi intercepté par le milieu qu'il allait traverser, le rayon lumineux cessera de se propager et semblera s'éteindre. Une couche de molécules gazeuses peut donc absorber les rayons qui lui sont sympathiques, c'est-à-dire ceux qui correspondent à la longueur d'onde qu'elle-même peut produire en vibrant, ce qui revient à dire qu'une substance réduite à l'état de gaz ou de vapeur absorbe précisé-

ment les rayons que cette même substance est capable d'émettre lorsqu'elle est incandescente. Il est bien vrai que, par le fait même de cette absorption, la masse gazeuse augmente la force vive qu'elle possède, que sa température s'élève et que, par suite, elle devient elle-même rayonnante, ce qui tend à substituer une raie lumineuse à la raie noire qu'elle produit; mais la ligne noire ne pourra disparaître qu'au moment où la couche gazeuse aura acquis un éclat égal à celui de la source, condition impossible à remplir lorsque la masse de gaz présente une assez grande épaisseur. Ainsi ces raies ne sont pas absolument noires, ce qu'on vérifie facilement sur le Soleil pour le sodium et pour quelques autres métaux.

Il arrive quelquefois qu'une masse incandescente émet des rayons qui se trouvent en dehors des limites des ondes normales; elle donne alors un spectre dont les raies lumineuses sont estompées. C'est ce qui arrive lorsqu'on brûle dans l'arc voltaïque certains métaux, tels que le sodium, le thallium, etc. Dans ce cas, les mêmes vapeurs ne se borneront pas à produire par absorption des raies noires linéaires : leur action absorbante s'étendra à distance, et les raies interverties seront elles-mêmes bordées de lignes estompées. C'est ce que nous avons vérifié pour les métaux que nous venons de citer.

Il peut encore arriver que l'absorption soit due à un gaz qui, au lieu de donner naissance à des ondes de même longueur que celles qui cherchent à le traverser, soit seulement capable de produire ce que nous pouvons appeler les *harmoniques* de ces mêmes ondulations. Alors l'absorption ne sera pas complète, les raies ne seront pas parfaitement noires, mais leur teinte plus ou moins foncée tranchera toujours sur le reste du spectre.

La théorie que nous venons d'exposer est actuellement admise par les physiciens, et l'on peut même dire qu'elle est

confirmée par la différence qui existe entre l'absorption produite par les gaz et celle qui est due aux corps liquides ou solides. Dans le premier cas, les raies sont ordinairement nettes, franchement terminées et parfaitement isolées les unes des autres; mais, lorsque les gaz sont soumis à des pressions très-considérables, l'action moléculaire paraît déjà faire sentir son influence, et les raies deviennent diffuses. Lorsqu'il s'agit des liquides ou des solides, l'absorption produit des zones nébuleuses, larges et mal terminées, qu'on ne peut réussir à partager en raies simples, distinctes les unes des autres. Ce résultat est évidemment dû à ce que les liens moléculaires, assez forts dans les solides et même dans les liquides, sont faibles ou à peu près nuls dans les gaz.

Cette théorie est générale, et l'on peut l'appliquer à d'autres cas qu'à l'absorption des raies spectrales produites par les vapeurs des corps simples. On peut l'appliquer, par exemple, à l'absorption exercée sur la chaleur rayonnante par les gaz composés. On voit alors que les liens de la cohésion moléculaire ne sont pas les seuls qui contribuent à déterminer la nature de cette absorption et que ceux de l'affinité chimique et de l'état de combinaison exercent aussi une influence très-considérable. Ainsi un simple mélange d'hydrogène et d'azote, comprimés de manière à occuper le même volume que le gaz ammoniac auquel ils pourraient donner naissance, absorbe une très-faible quantité de chaleur; il en est bien autrement de l'ammoniaque, qui, dans les mêmes circonstances, manifeste un pouvoir absorbant soixante fois plus considérable; on en peut dire autant de l'oxygène et de l'hydrogène : leur mélange possède un pouvoir absorbant beaucoup plus faible que celui de la vapeur d'eau qui résulte de leur combinaison. Les gaz simples ont, en général, un pouvoir absorbant très-faible, et, par conséquent, ils émettent

aussi fort peu de lumière, même lorsque leur température est très-élevée ; c'est ce qui fait que le mélange d'oxygène et d'hydrogène donne une flamme très-pâle, quoique très-chaude.

Outre les radiations lumineuses, le Soleil émet aussi des radiations chimiques et thermiques ; nous en parlerons plus tard. Appliquons maintenant à l'étude de la photosphère et de sa constitution les principes que nous venons d'exposer.



CHAPITRE IV.

APPLICATION DES PRINCIPES PRÉCÉDENTS A L'ÉTUDE DE LA CONSTITUTION SOLAIRE.

§ I. — *Explication des raies noires du spectre solaire.*

Avant les découvertes dues au spectroscope, on avait essayé à plusieurs reprises d'expliquer les raies noires découvertes par Fraunhofer. On les attribuait à des interférences entre les rayons voisins, ou bien au défaut de continuité dans l'indice de réfraction des ondes éthérées qui partent du Soleil. L'explication est devenue bien plus simple depuis que le spectroscope nous a fait connaître les conditions dans lesquelles se produit le phénomène. Les raies sont simplement des lacunes produites par l'absorption due aux vapeurs métalliques qui composent l'atmosphère solaire; chacune d'elles est en réalité le spectre renversé de quelque substance, dont la plupart nous sont inconnues. Si la lumière parvenait jusqu'à nous telle qu'elle est émise par la photosphère, le spectre serait continu comme celui de la flamme d'une bougie, car, à cause de la grande pression que les couches solaires supportent et de leur température élevée, tous les métaux doivent donner un spectre continu, comme dans les expériences de Cailletet et de Frankland; mais, au-dessus de la masse lumineuse, les rayons rencontrent une couche de vapeurs qu'ils sont obligés de traverser : c'est là que se produit l'absorption. Ces vapeurs sont à une température inférieure à celle de la

photosphère, mais assez élevée cependant pour qu'elles paraissent lumineuses dans quelques circonstances.

Si donc nous pouvions isoler du Soleil cette couche atmosphérique, si nous pouvions la projeter, non sur le fond brillant de la photosphère, mais sur le fond noir de l'espace, nous verrions, à l'aide du spectroscope, des lignes brillantes diversement colorées à la place des raies noires dont nous avons parlé jusqu'à présent. Telle est l'indication de la théorie, et nous verrons que ces prévisions ont été confirmées par les résultats de l'observation.

M. Kirchhoff, à qui nous devons l'explication que nous venons de reproduire, pensait que l'atmosphère solaire doit avoir une grande épaisseur; il croyait en trouver la mesure dans l'étendue de la couronne qui environne le Soleil pendant les éclipses. Il n'en est pas ainsi; la couche absorbante est en réalité très-mince, comme nous le verrons dans le quatrième Livre.

Dans le Chapitre premier de ce troisième Livre, nous avons étudié d'une manière générale l'absorption des rayons lumineux partis du Soleil, et cette étude nous avait déjà conduit à admettre l'existence d'une atmosphère dont la nature nous était inconnue. Nous savons maintenant que cette atmosphère est gazeuse, qu'elle est composée de vapeurs métalliques, les mêmes en partie que nous connaissons et que nous étudions sur la Terre, quoiqu'un grand nombre de ces substances nous restent encore inconnues. Ce résultat ne doit surprendre personne, car on admet assez communément que la matière qui compose l'univers doit être à peu près la même dans ses différentes parties, et d'ailleurs la température du Soleil doit être assez élevée pour volatiliser toutes les substances connues. Nous nous occuperons plus tard de la température du corps solaire; mais, en nous en tenant aux éva-

luations les plus modérées, nous pouvons dire que cette température suffit très-amplement pour volatiliser tous les métaux dont les raies renversées se retrouvent dans le spectre.

Dans la fabrication de l'acier par le procédé Bessemer, on observe des phénomènes qui serviront à faire comprendre notre pensée. Ce procédé consiste à décarburer la fonte en lançant un courant d'air comprimé à travers la masse en fusion. Au commencement de l'opération, la flamme donne naissance à un spectre continu, présentant quelquefois les raies du sodium, dues à des fragments de matière végétale ou à des poussières atmosphériques. Un peu plus tard, le carbone étant presque complétement brûlé et la température s'étant considérablement élevée, les raies du sodium apparaissent de nouveau; puis, à mesure que l'opération s'avance, le spectre perd peu à peu sa continuité; on voit se dessiner les raies brillantes du carbone et du fer, avec celles du calcium, du magnésium et d'un grand nombre d'autres substances qui se trouvaient dans le minerai, et que le traitement métallurgique n'a pas complétement éliminées. Le spectre est alors magnifique et, d'après l'évaluation des hommes compétents, la température ne dépasse pas 3000 degrés; on en peut conclure qu'il suffit de quelques milliers de degrés pour volatiliser les métaux les moins fusibles et pour communiquer à leurs vapeurs un pouvoir émissif et un pouvoir absorbant analogue à celui que possède l'atmosphère solaire.

Nous sommes donc en droit d'admettre que l'atmosphère du Soleil contient des vapeurs métalliques, et que ces vapeurs, en absorbant certains rayons lumineux, donnent naissance aux lacunes qui constituent les raies de Fraunhofer. Cette induction est, du reste, puissamment confirmée par une coïncidence qui suffirait à elle seule pour prouver la thèse que nous exposons en ce moment : nous voulons parler de la

coïncidence parfaite des raies noires du spectre solaire et des raies brillantes des métaux, coïncidence qui serait inexplicable si nous ne savions pas que les substances capables de produire par émission des raies brillantes sont aussi capables de produire par absorption des raies noires ayant même indice de réfraction et occupant la même position dans le spectre.

Cette théorie repose sur deux assertions fondamentales : 1° au-dessous de l'atmosphère absorbante, il existe une couche lumineuse qui émet des rayons de toute nature, et ces rayons, s'ils nous arrivaient sans être modifiés, donneraient naissance à un spectre continu; 2° l'enveloppe atmosphérique, dans laquelle se trouvent les métaux volatilisés, possède une température inférieure à celle de la couche lumineuse.

La première de ces deux assertions peut s'entendre de deux manières : la photosphère peut être composée, comme le sont les nuages, d'une espèce de brouillard dû à la condensation des vapeurs métalliques; elle serait formée d'un amas de gouttelettes liquides, ou même d'une poussière solide et cristalline possédant, en vertu de sa condensation même, un grand pouvoir émissif, et donnant naissance à un spectre continu propre à cette espèce de poussière vaporeuse. Telle était l'idée de Wilson; mais on peut admettre une autre explication : on peut penser que la photosphère est gazeuse, mais que la forte pression à laquelle elle est soumise et la haute température qu'elle possède lui communiquent le pouvoir d'émettre des rayons de toute nature et de donner naissance à un spectre continu. La première explication s'accorde mieux avec les apparences que présentent les taches et avec les observations que nous avons exposées dans les Chapitres précédents. La seconde repose sur l'hypothèse d'une forte pres-

sion, dont l'existence semble loin d'être démontrée, à la surface visible du Soleil, quoique elle doive être très-considérable à une certaine profondeur. Il résulte de tous les travaux et de toutes les observations, que l'atmosphère transparente du Soleil ne produit qu'une réfraction très-faible sur les rayons qui la traversent. Comment concilier ce faible pouvoir réfringent avec la densité que suppose une forte pression? D'ailleurs les raies de l'hydrogène ne conservent leur finesse que jusqu'à la pression de 440 millimètres; elles s'élargissent progressivement à mesure que l'on dépasse cette limite (Wüllner).

Ces conclusions ont été confirmées par Lee et Lockyer; ils ont étudié les raies qui se produisent dans un tube où le gaz est à la pression atmosphérique, et ils les ont comparées avec celles que l'on obtient à une faible pression : dans le premier cas, elles sont diffuses, tandis qu'elles sont nettement tranchées dans le second. On serait donc porté à croire, au premier abord, que nous pouvons déterminer la pression à laquelle est soumise l'atmosphère du Soleil, en étudiant la dilatation plus ou moins grande des raies noires que contient le spectre solaire. Malheureusement ce procédé serait défectueux et conduirait à des conclusions erronées, car, la dilatation dépendant à la fois de la pression et de la température, le problème est complétement indéterminé. Pour donner une idée des erreurs auxquelles on s'exposerait en tirant des conclusions prématurées, nous citerons une expérience de Lee. Lorsque la décharge électrique traverse un tube contenant un gaz suffisamment raréfié, les raies sont fines et nettement tranchées; mais, si l'on interpose dans le trajet un second tube contenant un gaz soumis à une assez forte pression, le spectre du gaz raréfié devient lui-même diffus et les raies s'épanouissent. C'est que l'étincelle ne peut être produite que

par une décharge plus forte et capable d'élever davantage la température. On se tromperait donc complétement si l'on voulait déterminer la pression d'un gaz par les indications du spectroscope.

Ainsi donc, quoique l'étude du Soleil nous montre les raies de l'hydrogène un peu diffuses et environnées d'une nébulosité sensible, ce qui semble indiquer un accroissement de densité, comme le même effet pourrait être produit par une élévation de température, il est impossible d'adopter une opinion définitive. Il est bien vrai que sur le Soleil la pesanteur est vingt-huit fois plus grande qu'à la surface de la Terre; mais la force expansive due à la chaleur n'apporte-t-elle pas une compensation plus que suffisante? Cette question demande évidemment à être éclaircie par des recherches ultérieures : nous devons, pour le moment, nous contenter de l'exposé des faits.

M. Frankland examinant au spectroscope la flamme due à l'explosion des mélanges d'hydrogène et d'oxygène, s'assura qu'il se produit dans ces circonstances un spectre continu. Il crut alors pouvoir affirmer que les gaz donnent généralement naissance à des spectres continus, lorsqu'ils sont élevés à de hautes températures et soumis à de fortes pressions. Ces conclusions n'étaient pas à l'abri de tout reproche et de toute contestation, car M. Frankland avait en réalité analysé le spectre de la vapeur d'eau plutôt que celui de l'hydrogène; mais cette étude a été reprise par M. Cailletet, qui a examiné les spectres des gaz pour des pressions qu'il a progressivement élevées jusqu'à 50 atmosphères. Il s'est assuré que, à partir de 14 atmosphères, les raies deviennent déjà très-diffuses et comme estompées. Cette diffusion s'accroît à mesure que la pression devient plus grande; à 50 atmosphères, le spectre est uniforme et si brillant qu'une étincelle de $\frac{1}{2}$ de

millimètre, produite par une bobine de 30 centimètres de longueur, est capable d'éclairer un vaste laboratoire. A cette pression, les raies du sodium deviennent elles-mêmes diffuses et estompées. M. Cailletet pense que, sous des charges convenables, les métaux eux-mêmes donneraient des spectres continus. La pression de 50 de nos atmosphères ferait équilibre, à la surface du Soleil, à une colonne de mercure de $1^m,34$ de hauteur, en supposant que ce métal pût conserver dans l'atmosphère solaire les propriétés physiques qu'il possède dans nos laboratoires. Si nous remplaçons cette colonne de mercure par une couche d'hydrogène, dans des conditions telles qu'il puisse donner des raies fines et nettement terminées, cette couche gazeuse vue de la Terre aura une épaisseur de quelques secondes seulement. Il est impossible de mieux préciser ces limites faute de données.

D'après M. Hirn, la force chimico-moléculaire qui retient unis les éléments de l'eau équivaut à une pression de 4600 atmosphères. Si l'on voulait obtenir cette même pression à la surface du Soleil avec une colonne de gaz ayant à peu près la même densité que l'air atmosphérique, dans les conditions normales de température et de pression, cette colonne vue de la Terre sous-tendrait un angle de 14 secondes seulement.

Rappelons maintenant les expériences de Cagniard de la Tour et Andrews, et nous verrons combien il est difficile de se prononcer. Ils cherchaient quelles sont les limites où se confondent, pour l'eau, l'état liquide et l'état gazeux. Dans leurs expériences, la température étant de 415 degrés, la pression ne s'éleva pas au-dessus de 400 atmosphères. La température du Soleil étant beaucoup plus élevée, la limite suppose une pression beaucoup plus considérable. La coexistence de ces deux inconnues simultanées, température et

pression, rend le problème indéterminé et nous empêche de le résoudre, en admettant une opinion plausible sur l'état physique de la matière qui compose la couche photosphérique. Ajoutons, avec M. Lee, une troisième considération dont il faut tenir compte et qui contribue à rendre le problème plus difficile à résoudre. Nous cherchons constamment à comparer les phénomènes qui s'accomplissent à la surface du Soleil à ceux que nous produisons dans nos laboratoires : cette comparaison est-elle légitime? Il faudrait pour cela que ces phénomènes fussent produits, de part et d'autre, dans des circonstances identiques ou du moins comparables. En est-il ainsi? C'est ce que nous ne saurions affirmer, car il peut bien se faire que les courants électriques auxquels nous avons recours exercent une influence perturbatrice sur la période d'oscillation des molécules ; il en résulterait des phénomènes tout à fait différents de ceux que nous voulons étudier par comparaison. Malgré les difficultés que nous venons de signaler, nous reviendrons sur cette question lorsque nous aurons étudié en détail les phénomènes que nous offre l'atmosphère solaire.

Une seconde condition est nécessaire pour notre théorie : l'enveloppe atmosphérique, dans laquelle se trouvent les métaux volatilisés, doit posséder une température inférieure à celle de la photosphère. Rien n'est plus naturel et plus facile à justifier. La couche transparente étant la plus éloignée du centre est aussi celle qui est le plus immédiatement exposée aux effets du rayonnement ; il est donc naturel qu'elle se refroidisse plus vite et que sa température soit plus basse que celle des couches inférieures. Elle n'en reste pas moins gazeuse, à cause de sa température élevée et de la nature des substances qui la composent. Lorsque ces vapeurs arrivent à l'état de saturation, elles se condensent, mais en partie seule-

ment, et il en reste toujours une certaine quantité à l'état de fluide élastique. C'est ainsi que, dans notre atmosphère, il existe encore de la vapeur d'eau dans les régions supérieures aux nuages.

La photosphère émet donc des rayons de toute nature capables de donner un spectre continu; mais, comme ces rayons ne peuvent parvenir jusqu'à nous sans traverser la couche absorbante, quel que soit le point vers lequel nous dirigions le spectroscope, le spectre sera toujours rempli d'une multitude de raies noires.

D'ailleurs tous ces raisonnements sont devenus inutiles depuis que l'observation directe nous a montré la présence des raies brillantes à la surface du Soleil. Nous pouvons affirmer avec certitude que l'atmosphère qui environne cet astre contient, à l'état de vapeur, tous les métaux dont nous voyons les raies renversées dans le spectre solaire : tels sont le sodium, le magnésium, l'hydrogène, le calcium, le baryum, le fer, le titanium, le chrome, le manganèse, le nickel, le cobalt, le cuivre, le zinc, etc. Malgré la différence qui existe entre leurs densités, ces vapeurs tendent, en vertu de leur pouvoir diffusif, à se mélanger entre elles comme les gaz proprement dits. On trouve cependant que les vapeurs les plus lourdes sont plus abondantes dans les parties basses de l'atmosphère. En effet, en observant au spectroscope le bord extrême du Soleil et en le projetant sur le fond noir du ciel, ce que nous faisons pendant les éclipses, on a reconnu facilement que les raies noires se renversent et deviennent brillantes. Celles de l'hydrogène sont plus faciles à observer; on reconnaît ainsi que ce gaz s'élève notablement au-dessus de la photosphère, et qu'il forme une couche continue au-dessus des autres vapeurs métalliques. Nous croyons pouvoir anticiper un peu sur les développements que nous devons donner plus loin : ces

recherches seront plus faciles à comprendre lorsque nous aurons exposé l'historique des découvertes qui les ont amenées; nous nous contenterons ici d'exposer une observation dans laquelle nous avons réussi à voir, au bord du disque solaire, un spectre continu. Comme cette opération est très-délicate, nous en expliquerons tous les détails.

Nous avons employé notre grand équatorial de 25 centimètres d'ouverture; l'image était amplifiée par l'objectif d'un microscope d'Amici et se projetait nettement sur la fente du collimateur. Le spectroscope était composé de trois prismes en flint lourd très-dispersif; nous y avons ajouté un prisme à vision directe équivalant à deux autres. La fente du collimateur étant parallèle au bord, le mouvement d'horlogerie fut réglé de manière à permettre au disque solaire de s'approcher lentement du champ de la lunette. L'appareil étant ainsi disposé, nous avons pu constater les phénomènes suivants: 1° à une petite distance du bord, la lumière extérieure est assez vive pour donner naissance à un spectre rayé de noir, dans lequel on peut distinguer nettement les raies les plus fines; 2° la distance devenant encore plus faible, on voit paraître les raies brillantes de l'hydrogène; 3° ces raies brillantes perdent leur intensité, et il arrive un moment où toutes les raies noires disparaissent, à l'exception des plus fortes, telles que D et *b*; 4° la couche qui donne ainsi un spectre continu est extrêmement mince : on voit bien vite apparaître le spectre rayé de noir, qui annonce le bord véritable du Soleil.

Le phénomène observé dans la troisième phase ne peut s'expliquer que de deux manières : ou bien la couche que nous observons alors est celle qui rayonne directement et fournit un spectre continu, ou bien c'est celle qui renverse partiellement les raies noires de certains métaux, comme la couche

rose renverse celles de l'hydrogène. Dans cette dernière hypothèse, cette même couche, ayant un pouvoir trop faible pour rendre brillantes les raies sur lesquelles elle agit, ne produirait qu'un renversement partiel, c'est-à-dire un effacement apparent de ces mêmes raies, comme il arrive pour l'hydrogène au delà des protubérances. Cette dernière explication est la véritable, et elle se trouve confirmée par l'observation des éclipses. Nous verrons que M. Tacchini, sous le beau ciel de Palerme, peut presque habituellement observer les raies du magnésium renversées. Enfin M. Young a confirmé notre observation en la répétant sur le mont Sherman.

On ne doit pas s'étonner de voir persister les raies noires D et *b*, car les vapeurs qui les produisent (sodium et magnésium) ont une faible densité et un grand pouvoir absorbant. Après l'hydrogène et les gaz proprement dits, ces corps sont ceux dont les vapeurs ont le poids spécifique le plus faible; ces vapeurs s'élèvent nécessairement à une très-grande hauteur, et, comme elles sont très-absorbantes, elles doivent, même lorsqu'elles sont en petite quantité, donner naissance à des lignes très-sombres et presque noires. L'expérience nous montre, en effet, que, sous une épaisseur de quelques mètres seulement, la vapeur de sodium renverse le spectre si brillant de la lumière électrique. Nous aurons occasion de citer d'autres exemples de ce renversement qui compléteront l'étude du spectre solaire.

L'observation que nous venons de décrire est très-délicate et très-difficile à faire : aussi exige-t-elle des circonstances exceptionnelles et de très-grandes précautions. L'image solaire doit être très-nette et parfaitement tranquille; on doit employer un grossissement considérable et se servir d'un spectroscope puissant.

Le phénomène que nous signalons ici est parfaitement d'accord avec ce que nous avons observé pendant l'éclipse de 1860. Après avoir vu disparaître le bord du Soleil, nous signalâmes une couche atmosphérique très-blanche et très-brillante; puis on aperçut ensuite la couche rose et les protubérances. Or il semble bien que cette partie brillante que nous avons aperçue entre la couche rose et le bord du disque est celle-là même qui donne le spectre continu.

L'atmosphère solaire doit contenir toute espèce de vapeurs mélangées ensemble d'après les lois de la diffusion; elles s'élèvent cependant à des hauteurs d'autant plus considérables qu'elles sont plus légères. C'est ce qu'on pourra reconnaître en examinant le tableau suivant, dans lequel on a rangé dans l'ordre croissant de leurs poids atomiques les substances dont on a reconnu l'existence dans le Soleil. Nous y avons inséré l'aluminium, le silicium et le potassium, quoiqu'on n'ait pas parfaitement démontré qu'ils existent dans l'atmosphère solaire.

Hydrogène	1
Sodium	23
Magnésium	24
Aluminium	27
Silicium	28
Potassium	39
Calcium	40
Chrome	52
Manganèse	52,5
Fer	56
Cuivre	63,5
Zinc	65
Baryum	137 ou 2 × 68,5

Si un grand nombre de corps, regardés comme simples

par les chimistes, et particulièrement les métaux précieux, n'ont pas encore été signalés, il n'en faut pas conclure qu'ils ne s'y trouvent point. Ce fait purement négatif peut s'expliquer par la densité considérable de ces vapeurs métalliques, qui se trouvent par là retenues dans des régions profondes et inaccessibles à l'analyse spectrale.

Dans tout ce que nous venons de dire, nous avons toujours supposé que les substances qui existent dans la photosphère ne peuvent donner que des spectres continus : il est cependant possible qu'il y ait aussi des corps capables de donner directement des raies lumineuses échappant à toute absorption, soit à cause de l'élévation considérable à laquelle parviennent leurs vapeurs, soit parce qu'il n'y a pas au-dessus d'elles une couche plus froide et composée de la même substance, qui en absorbe les ondes. C'est peut-être à cette cause qu'il faut attribuer des bandes et des lignes beaucoup plus vives et plus brillantes que les autres qui se trouvent dans certaines régions du spectre. On en voit une après le groupe b^{IV} du magnésium, à la longueur d'onde = 516,55, et plusieurs autres dans le jaune, dans le vert et dans le violet. Nous ne pouvons entrer à ce sujet dans de plus grands détails; nous renverrons le lecteur aux nombreuses Communications que nous avons adressées à l'Institut de France, et qui ont été insérées dans les *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, en 1868 et 1869.

§ II. — *Analyse spectrale des taches solaires.*

Les procédés ordinaires de l'analyse spectrale nous font connaître l'ensemble des rayons qui émanent du Soleil après avoir traversé son atmosphère; mais on peut se demander

si toutes les parties du globe solaire émettent des rayons identiques et donnent naissance à des spectres parfaitement semblables. Il semble bien difficile que, sur une surface d'une aussi grande étendue, il y ait une homogénéité parfaite, et naturellement la pensée se reporte sur les taches. On est porté à se demander si ces régions, si différentes des autres à tant de points de vue, ne doivent pas aussi offrir des particularités remarquables relativement aux radiations qu'elles nous envoient.

Pour répondre à cette question, il ne suffit pas de diriger simplement le spectroscope vers le Soleil : il faut analyser en particulier les rayons provenant des différentes parties de cet astre. Pour cela, on reçoit sur le plan de la fente l'image du Soleil produite au foyer de l'objectif, et l'on fait tomber sur la fente elle-même l'image du point que l'on veut étudier ; mais l'objectif d'une lunette ne produit ordinairement en son foyer qu'une image très-petite, et il est impossible d'en examiner séparément les différentes parties : en conséquence nous avons cherché à amplifier autant que possible l'image des taches ; sans cette précaution, il serait très-difficile de démêler les différents phénomènes, et c'est pour n'avoir pas employé des grossissements assez considérables que tant d'observateurs ont échoué dans ces recherches. Nous avons employé pour ces observations notre grand équatorial de Merz. En plaçant à une petite distance du foyer l'objectif achromatique d'un microscope d'Amici, nous obtenions une image du Soleil qui, projetée sur un écran placé au lieu de la fente, aurait eu $0^{m},22$ ou $0^{m},23$ de diamètre. L'image des taches atteignait alors une grandeur considérable, et, par une coïncidence très-heureuse, les taches ayant été très-nombreuses pendant les mois d'avril et de mai 1869, nous avons pu les étudier attentivement à ce point de vue parti-

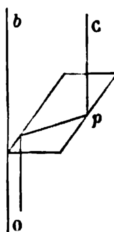
culier et suivre avec succès les différentes phases qu'elles présentent. L'image d'une tache acquérait quelquefois plus de $0^m,01$ de diamètre, de sorte que, en limitant par des diaphragmes la longueur de la fente à $0^m,002$ environ, on pouvait explorer successivement les différentes parties de l'ombre et de la pénombre. Nous avons de plus employé des prismes très-puissants, dont le nombre a varié de trois à cinq. Les mesures étaient prises soit avec une échelle graduée sur verre et adaptée à l'oculaire, soit à l'aide de fils micrométriques. Dans la suite de notre travail, toutes les raies ont été comparées avec les figures de Kirchhoff; mais, dans l'exposé que nous allons faire, nous les rapporterons aussi à celle de Van der Willingen, que nous avons déjà reproduite et qui est plus facile à reconnaître. M. Donati, de Florence, a dernièrement employé cette méthode d'observation avec son spectroscope à vingt-cinq prismes, et il a parfaitement vérifié nos conclusions.

Voici les résultats auxquels nous sommes parvenu, et qui, nous sommes heureux de le dire, ont été confirmés par M. Lockyer, puis par M. Young, de Dartmout-College, et enfin par M. Donati. Pour plus de détails, on peut voir le Mémoire que nous avons écrit sur le spectre solaire, imprimé dans les *Atti della Società italiana de XL di Modena*, 3e série, t. II, p. 1.

1° En dirigeant le spectroscope vers les différentes régions du disque solaire, on trouve partout les mêmes raies principales; quant aux raies secondaires, nous ne pouvons pas être aussi affirmatif : elles s'évanouissent en certains endroits, mais leur disparition peut bien être due à un plus grand éclat que possèdent ces points. On remarque cependant des variations très-considérables auprès du bord : plusieurs systèmes de lignes très-fines, qu'on aperçoit difficilement au

centre, deviennent alors très-visibles; elles présentent en même temps un aspect indécis et comme nébuleux, leurs bords n'étant pas nettement terminés. C'est ainsi que les raies du sodium ne présentent plus la même netteté et deviennent diffuses. Pour faire avec rigueur une étude comparative, il faut juxtaposer les spectres de deux points éloignés l'un de l'autre; on reconnaît par là si les différences tiennent seulement à l'intensité de la lumière, ou si elles sont dues à la position et à la nature des raies. C'est ce qu'a fait tout récemment M. Hastings, astronome américain, qui a imaginé

Fig. 100.



un appareil très-simple pour obtenir ce résultat. On place devant une moitié de la fente un prisme parallélipipède P (*fig.* 100); les rayons émanés du centre du disque solaire C subissent deux fois la réflexion totale pour entrer dans la fente du spectroscope, tandis que les rayons provenant des bords du disque *b* pénètrent directement par l'autre moitié de la fente. Les deux spectres sont ainsi juxtaposés, et l'on peut les examiner ensemble dans le champ de la même lunette. Il va sans dire que les dimensions du prisme doivent être calculées d'après celles de l'image que produit la grande lunette du téléspectroscope. L'intensité des rayons se trouve diminuée par l'absorption due au prisme et par les deux réflexions qu'il produit; mais si on le dispose de telle sorte

qu'il reçoive les rayons provenant de la partie centrale du disque, cette diminution, loin d'être nuisible, sera très-utile pour obtenir deux faisceaux de même intensité.

Même avant de faire usage de cet instrument, nous avions déjà constaté qu'une simple diminution de l'intensité lumineuse ne peut pas produire les effets que nous avons observés. Ces altérations ne peuvent donc s'expliquer que par l'influence de la couche atmosphérique que traversent les rayons, et qui devient plus épaisse auprès du bord. Les raies D, en particulier, sont tellement diffuses qu'il est impossible de ne pas reconnaître là un résultat de l'absorption. Cependant, comme cette absorption ne devient considérable que pour les régions très-voisines du bord, on doit dire que la couche absorbante a une épaisseur comparativement faible.

2° Dans le voisinage des taches, et principalement sur les facules qui les environnent, les raies noires de l'hydrogène sont toujours plus faibles ; quelquefois elles disparaissent complétement et finissent même par se renverser. La raie C est celle qui subit les plus grandes variations. La raie F ne disparaît jamais complétement ; elle paraît accompagnée d'une autre ligne noire qui n'appartient pas à l'hydrogène. Les mêmes particularités se reproduisent pour d'autres raies, surtout pour celles du magnésium. Nous verrons bientôt que ce phénomène est dû à d'immenses éruptions de vapeurs métalliques, parmi lesquelles domine l'hydrogène. Ces masses de gaz donneraient naissance à des raies brillantes si elles étaient isolées ; mais, inondées comme elles le sont par la lumière éclatante du Soleil, elles parviennent tout au plus à produire un effet égal et contraire à celui de la couche absorbante qui les environne. Lorsqu'elles sont assez vives, elles peuvent produire un effet plus considérable et mani-

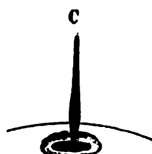
fester leur présence par des raies brillantes : c'est ce qui arrive assez fréquemment.

Lorsqu'une tache est près du bord, on voit très-souvent les raies brillantes de l'hydrogène empiéter sur le disque solaire lui-même et se prolonger sur un espace de plusieurs secondes jusqu'au noyau obscur; là elles s'arrêtent brusquement. La *fig.* 102 représente la disposition de ces raies brillantes. Cependant, lorsqu'une tache est traversée par un pont, et surtout lorsque le noyau est recouvert de voiles rouges, on y trouve la raie C renversée ou du moins très-réduite.

3° Dans l'intérieur des taches, le spectre subit une profonde modification; l'harmonie générale n'est plus la même, et le rapport des intensités lumineuses est complétement changé. Certaines lignes, qui d'ordinaire sont à peine visibles, deviennent très-noires et très-larges; d'autres deviennent indécises sur les bords; d'autres, enfin, ne

subissent aucune modification. La *fig.* 101 montre combien le spectre d'une tache peut être complexe; elle reproduit les résultats des observations que nous avons faites

Fig. 102.



le 11 et le 13 avril 1869, en examinant une tache dont nous reproduisons ici le dessin (*fig.* 103). On voyait en réalité

Fig. 103.



quatre spectres différents : 1° celui du fond brillant du Soleil, 2° celui de la pénombre, 3° celui du noyau, et 4° celui d'un pont très-brillant qui traversait la tache.

La bande n° **2** (*fig.* 101) représente le spectre du noyau. On y remarque une diminution générale de l'éclat lumineux

et surtout des lignes très-sombres considérablement élargies, et même de véritables bandes presque complétement noires. On en voit une entre B et C, deux autres entre C et D, deux autres entre E et F; ce qu'il y a de plus remarquable, ce sont les trois couples de raies brillantes qui se retrouvent entre *b* et F.

La bande n° 1 représente le spectre du pont. On y voit renversées les raies de l'hydrogène $H\alpha = C$, $H\beta = F$, $H\gamma = H$.

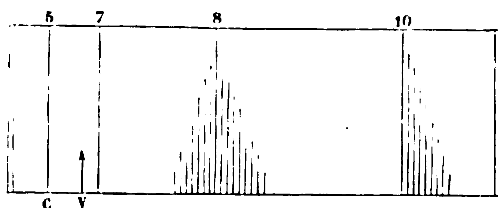
La zone n° 3 donne le spectre de la pénombre; on n'y voit aucune raie de l'hydrogène, ni noire ni brillante : c'est que le spectre de ce gaz y est partiellement renversé, comme on le reconnaît facilement en comparant cette bande avec le n° 4, qui donne les raies principales du fond général du disque solaire.

Il est évident que des modifications aussi profondes ne sauraient être attribuées à une simple diminution dans l'intensité lumineuse. Il y a donc là une absorption spéciale et élective produite par certaines substances qui se trouvent dans l'intérieur des taches. Ce sont des phénomènes nettement tranchés que nous allons essayer d'analyser.

4° On distingue dans le spectre général du Soleil plusieurs systèmes de raies très-fines, très-serrées, également distantes les unes des autres; on a désigné ces systèmes par le nom de *persiennes,* à cause des apparences qu'elles présentent. Dans les taches, elles deviennent diffuses et nébuleuses, comme on peut le voir près des raies 6, 7, 8, 9 de la figure de Van der Willingen (711,5, 719,5 et 864 de Kirchhoff) et dans le voisinage des raies 14 et 15 (1006,8 et 1204 de K.). La *fig.* 104 donne une idée sommaire des apparences qui se présentent dans la région comprise entre C et D. Les systèmes de raies qu'on observe dans cette région ont une intensité graduellement croissante ou décroissante; elles sont assez

distinctes, mais d'apparence nébuleuse. Dans la région du vert, il y en a un très-grand nombre qui deviennent très-noires dans les taches, tandis que sur le reste du disque on a beaucoup de peine à les distinguer. Ces systèmes ne paraissent cependant pas être des créations nouvelles tout à fait particulières aux taches; ils correspondent ordinairement à des raies très-faibles indiquées par Kirchhoff; mais ces raies prennent dans les taches un développement extraordinaire, ce qui constitue un phénomène bien tranché et complétement caractéristique. On ne connaît pas encore les substances qui produisent ces *persiennes;* mais elles sont certainement ga-

Fig. 104.



zeuses, et il paraît bien probable que la vapeur d'eau n'y est pas étrangère, car nous avons vu des brouillards et des nuages légers produire le même effet en passant devant le Soleil.

Nous avons essayé de diminuer l'intensité générale de la lumière solaire en mettant des diaphragmes à l'ouverture de la lunette; mais nous n'avons obtenu par ce procédé aucun phénomène analogue à celui que nous venons de décrire. Il est donc impossible d'expliquer ces apparences par le seul fait de l'affaiblissement de la lumière sur les taches. Cette explication nous paraît inconciliable avec l'existence des bandes brillantes, qui restent très-distinctes au milieu du fond obscur : telle est celle qui se trouve auprès de la

raie 7 W. (719,5 K.), marquée par une flèche dans la *fig.* 104. L'éclat que présentent ces bandes lumineuses est purement relatif; il résulte de ce que les rayons correspondants sont moins complétement absorbés que ceux du voisinage. Il faut en dire autant des couples de raies brillantes que nous avons déjà signalées dans le vert. Des taches, qui au premier abord paraissent insignifiantes, donnent quelquefois des spectres qui dénoncent une absorption très-puissante; mais, en général, il faut attendre davantage des taches circulaires, profondes et bien noires au centre.

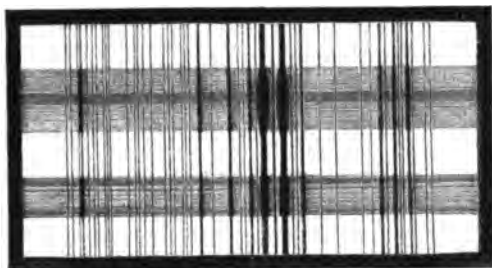
5° Plusieurs raies appartenant à des substances métalliques se dilatent d'une manière considérable, tout en conservant leurs bords nettement tranchés. Il est très-facile de constater cet élargissement dans les raies 10, 11 et 12 de Van der Willingen (864, 877, 895 K.). Dans le vert, il y en a qui deviennent trois ou quatre fois plus larges lorsque les taches sont rondes et profondes. Nous avons constaté ce phénomène sur un très-grand nombre de raies, qu'il serait trop long d'indiquer ici. Nous signalerons seulement celles du calcium et du fer, pour lesquelles le phénomène est plus saillant.

6° Les raies du sodium s'élargissent aussi; mais, contrairement aux autres, elles deviennent diffuses sur les bords et véritablement nébuleuses. La *fig.* 105 représente l'apparence qu'offre le spectre lorsqu'il traverse deux taches. Les expériences de M. Cailletet ayant prouvé que les raies du sodium deviennent diffuses et nébuleuses lorsque la pression est considérable, on est autorisé à admettre que la dilatation dont nous venons de parler est un résultat de la forte densité que possèdent alors ces vapeurs. Le sodium n'est pas le seul métal qui présente ce phénomène; dans le vert, nous avons des raies qui deviennent très-diffuses, surtout entre *b* et F; mais le sodium l'emporte tellement sur les autres, que l'in-

tervalle entre deux lignes consécutives disparaît quelquefois complétement.

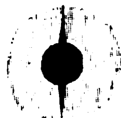
7° Les raies s'élargissent graduellement depuis le bord extérieur de la pénombre jusqu'au noyau, de sorte que leurs

Fig. 105.



extrémités se terminent en pointes effilées (*fig.* 106). Nous devons en conclure que la couche absorbante qui produit cette dilatation va en augmentant depuis le contour extérieur jusque vers le voisinage du noyau. Ce phénomène nous rap-

Fig. 106.

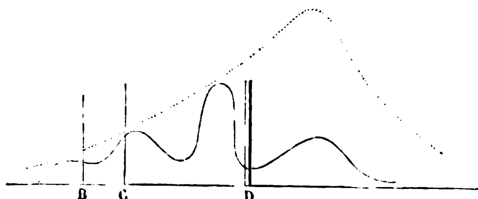


pelle une remarque que nous avons eu souvent l'occasion de faire dans nos observations : lorsqu'on emploie de forts grossissements, la ligne de démarcation entre la pénombre et la photosphère n'est pas nettement tranchée comme celle qui sépare la pénombre du noyau. Cette particularité s'observe plus facilement dans les photographies agrandies des taches; leur contour extérieur ne présente jamais cette netteté à laquelle on est accoutumé lorsqu'on observe directement avec

de faibles grossissements. Il y a donc un accroissement progressif dans l'épaisseur de la couche absorbante depuis le contour extérieur jusqu'au noyau.

8° Outre ces modifications caractéristiques qu'éprouvent les raies, on voit aussi varier l'intensité lumineuse des différentes parties du spectre, surtout dans le rouge, dans le jaune et dans le vert. On voit se former des bandes sombres, principalement entre les points B et C, et dans le voisinage du point D. La *fig.* 107 présente la courbe des intensités relatives des différentes régions du spectre dans la partie la moins

Fig. 107.



réfrangible. Une forte bande se forme près de la raie 16 W. (1207 K.), et une autre près de la raie 8 W. (entre 719, 5 et 850 K.). Il y a, en outre, un très-grand nombre d'autres bandes très-fines entre 17 et 20 W. (1280 et 1421,6 K.). Ces variations d'intensité sont faciles à constater, mais difficiles à évaluer, car elles ne présentent rien de bien défini. Le phénomène est cependant incontestable, et il est indépendant de l'élargissement des raies noires ; car l'espace compris entre 9 et 13 W. (850 et 895 K.) demeure très-brillant, malgré la dilatation des raies du calcium et du fer. Notons en passant, comme une particularité bien remarquable, que ces bandes ont une très-grande ressemblance avec celles qu'on observe dans le spectre des étoiles rouges.

9° Malgré l'absorption très-considérable qu'on observe

dans l'intérieur des taches, il y a des raies qui demeurent parfaitement brillantes, sans éprouver la moindre variation dans leur intensité. Leurs positions correspondent à des intervalles indiqués par Kirchhoff, comme ne contenant aucune raie. Ces positions, sur la figure que nous avons reproduite, se trouvent à peu près entre 14 et 15, 16 et 17, 17 et 18, 19 et 20, 21 et 22 de Van der Willingen. Elles sont bien reconnaissables, sur la figure de Kirchhoff, à l'absence de toute raie secondaire, et elles corespondent aux positions suivantes :

De 1207,2 à 1217,5	
	98,4
De 1306,5 à 1315,9	
	123,
De 1430,5 1438,9	
	102,7
De 1533,3 à 1541,6	
	120,9
De 1762,1 à 1771,5	
	113,0
De 1876,8 à 1884,5	

On voit que ces bandes sont à peu près équidistantes, et que leur largeur correspond à peu près constamment à 10 degrés de l'échelle de Kirchhoff. Le spectre des étoiles rouges présente dans la région du vert des raies tout à fait analogues à celles que nous venons de décrire : il semble donc que, si le Soleil était recouvert sur toute sa surface d'une atmosphère épaisse, comme celle qui existe au fond des taches, il donnerait naissance à un spectre semblable à celui des étoiles rouges.

10° Il y a une grande analogie entre l'absorption qui se produit dans les taches et celle qu'on observe lorsque le Soleil est près de l'horizon; mais les lignes nouvelles qui se produisent et celles qui se dilatent ne sont pas les mêmes dans les deux cas. Ainsi la raie C[6] de Brewster devient très-large lorsque le Soleil est près de l'horizon, tandis qu'elle est invisible dans les taches. Nous avons suivi attentivement

les variations qu'éprouve cette ligne auprès de l'horizon, et nous avons trouvé que les *persiennes* se produisent de part et d'autre de C[6], les raies telluriques étant situées du côté de C, et les raies solaires du côté de D : elles n'auraient donc pas toutes la même origine.

Les raies qui se forment près de 7W. (719 K.) sont plus sensibles dans les environs des taches que sur les taches elles-mêmes. La bande qui se trouve au delà du point D, et que Brewster a désignée par la lettre δ, quoique produite par l'atmosphère terrestre, existe cependant indépendamment de notre atmosphère. L'absorption atmosphérique peut cependant la renforcer dans les taches, car, lorsque le Soleil s'approche de l'horizon, on la voit apparaître sur les noyaux alors qu'elle est encore invisible sur les autres points du disque. Nous croyons aussi que les raies nébuleuses comprises entre 7 et 8 W. (719 K.) sont dues à la vapeur d'eau, car elles sont bien plus prononcées lorsque le Soleil est près de l'horizon ; un simple cirrus passant devant le disque solaire suffit pour les rendre plus visibles.

Malgré la haute température du Soleil, nous n'hésitons pas à admettre que son atmosphère contient de la vapeur d'eau, car on voit, très-près du bord, les mêmes nuances et les mêmes bandes diffuses que nous avons souvent observées, lorsque l'air atmosphérique est chargé d'humidité au moment où un nuage translucide passe devant le disque solaire.

§ III. — *Conséquences qui découlent des faits précédemment exposés.*

Les détails dans lesquels nous sommes entré ne sont qu'un faible échantillon de l'immense travail qu'il reste encore à faire pour compléter l'étude spectrale de la surface

solaire. Cet examen, quoique imparfait, nous fournit cependant des principes féconds, d'où nous pourrons tirer un grand nombre de conclusions.

Les taches sont des régions caractérisées par un accroissement considérable du pouvoir absorbant, et le renforcement des raies, qui se produit au bord du disque, tient évidemment à la même cause. Il y a cependant une grande différence entre ces deux ordres de phénomènes; car, tandis qu'auprès du bord l'absorption paraît due à des gaz proprement dits, dans les taches elle est principalement produite par des vapeurs métalliques. Lorsque les taches sont superficielles, on voit simplement se renforcer les raies D qui appartiennent au sodium ; lorsqu'elles sont de profondeur moyenne, les raies du calcium se renforcent également, mais on ne voit aucune modification dans celles du fer. Enfin, lorsque les taches sont très-sombres, ce qui permet de juger qu'elles sont aussi très-profondes, les raies du fer subissent à leur tour une dilatation considérable, mais moindre que celles du calcium. La région des taches serait donc occupée par des vapeurs métalliques assez denses, par exemple celles du sodium, du fer, du calcium, etc. Le sodium et le calcium, dont le poids atomique est plus faible, sont aussi ceux dont les raies s'élargissent davantage. Les autres métaux, le cobalt, le chrome, le plomb, ne présentent pas de changement appréciable, ce que nous attribuons à la densité de leurs vapeurs qui les force à rester dans des couches plus profondes. C'est sans doute la même cause qui empêche de reconnaître la présence des métaux précieux, dont les vapeurs sont encore plus denses. En réfléchissant sur ces phénomènes, on est conduit à admettre que, dans l'intérieur des taches, les vapeurs métalliques sont disposées par ordre de densité, les plus lourdes au fond, les plus légères à la

partie supérieure, et au-dessus de toutes les vapeurs métalliques le gaz hydrogène, formant une couche continue qui enveloppe de toutes parts le globe solaire tout entier.

Le spectre des taches ne présente point de raies nouvelles : on n'y voit que celles de l'atmosphère solaire plus ou moins renforcées. Il n'y a donc point de substances nouvelles dans ces régions, mais seulement une densité plus considérable pour certaines vapeurs. Or nous savons qu'il y a dans les taches une dissolution continuelle de la matière photosphérique ; il devrait donc en résulter une absorption élective toute différente, si la photosphère contenait d'autres éléments que ceux qui constituent la couche atmosphérique.

Cette conclusion resterait encore la même si, au lieu de comparer la photosphère à un brouillard qui se dissout dans les taches, nous la regardions comme une masse gazeuse soumise à une pression assez considérable pour donner un spectre continu. Dans ce cas, le gaz incandescent, se mélangeant à la masse de vapeur plus froide qui compose le noyau de la tache, cesserait d'être aussi lumineux pour devenir relativement obscur ; or, comme dans ce nouvel état il ne produit pas d'autres raies que celles de la couche absorbante, la photosphère doit encore être composée des mêmes substances que la couche gazeuse qui l'environne.

Des faits précédemment exposés, nous pouvons encore conclure que la profondeur des taches ne peut servir de mesure à l'épaisseur de la photosphère, comme on l'a cru jusque dans ces derniers temps. Ce qu'on mesure ainsi, c'est l'épaisseur de la couche dense et absorbante qui occupe les parties les plus basses des taches. Nous voyons sur la Terre des gaz plus lourds que l'air, l'acide carbonique par exemple, former dans certaines cavités une atmosphère irrespirable, comme dans la Grotte du Chien ; il arrive de même, sur le

Soleil, que les vapeurs métalliques, malgré leur tendance à la diffusion, occupent le fond des cavités qui constituent les taches : ce qui n'empêche pas que ces gaz pesants ne se mélangent un peu avec le reste de l'atmosphère, comme le font, dans l'air qui nous entoure, l'acide carbonique et la vapeur d'eau.

Enfin la partie noire qui occupe l'intérieur des taches ne peut être expliquée, ni par un noyau obscur qui serait au centre du globe solaire, ni par des scories ou autres matières solides flottant à la surface d'un liquide. Cette obscurité est due à des masses *transparentes,* mais fortement *absorbantes,* de vapeurs métalliques qui, grâce à leur densité considérable, occupent les parties les plus basses des inégalités de la surface lumineuse, et remplissent les vides et les interstices que laissent quelquefois entre elles les masses brillantes qui nous éclairent.

Nous nous trouvons amené par là à compléter ce que nous avons dit dans un Chapitre précédent sur la structure intérieure des taches, que nous avons représentées comme des masses obscures envahies par la matière lumineuse : le spectroscope vient de confirmer cette idée, et il nous apprend que les matières sombres sont gazeuses.

Il ne sera pas inutile de résumer ici tout ce que nous avons dit sur ce sujet en quatre affirmations que nous devons regarder maintenant comme prouvées : 1° la matière obscure et la matière lumineuse ne sont pas de nature différente; 2° le noyau noir des taches ne peut être produit par un corps solide : il résulte de l'absorption produite par des vapeurs dans la partie centrale de la tache où les filets de matière lumineuse ne sont pas encore parvenus ; 3° la matière brillante se dissout en pénétrant dans cette masse absorbante et elle cesse d'être lumineuse ; 4° la masse obscure ne pourra

résister indéfiniment à cette action, et l'on verra le noyau se recouvrir progressivement de la matière lumineuse qui l'envahit. La disparition de la tache pourra être retardée par une recrudescence qui amène une nouvelle quantité de matière obscure; mais ce phénomène ne pourra pas se reproduire indéfiniment, et la tache finira par disparaître, faute d'alimentation.

§ IV. — *Réponse à une objection.*

On s'est demandé pourquoi nous n'observons dans le Soleil ni l'oxygène, ni l'azote, ni aucun des autres gaz qui doivent cependant y exister aussi bien que sur la Terre. Cette question n'est pas facile à résoudre. D'abord ces gaz pourraient bien se trouver dans l'atmosphère solaire sans qu'il nous fût possible de les y reconnaître, parce que, à la température qu'ils possèdent, ils ne présentent plus les mêmes raies qu'aux températures auxquelles nous les observons ordinairement dans nos laboratoires. Les gaz ont tous plusieurs spectres différents les uns des autres suivant la température de l'expérience et suivant les combinaisons qu'ils forment. Qu'on prenne un tube de Geissler composé de deux parties, l'une ayant un diamètre assez considérable, l'autre ayant une section capillaire : on trouve dans ces deux parties deux spectres très-différents pour le même gaz. On observe ce fait pour le brome, le chlore et l'hydrogène. De plus, l'azote présente, suivant les circonstances, trois spectres différents nettement définis. Il arrive quelquefois que, pour des températures intermédiaires, deux spectres d'ordre différent se superposent l'un à l'autre.

Les expériences de M. Chautard nous apprennent que les

tubes de Geissler donnent des spectres différents lorsqu'on les soumet à l'action de puissants aimants. Le magnétisme n'agit peut-être là qu'en produisant indirectement un changement de température. Les gaz sont magnétiques ou diamagnétiques : ils sont donc attirés ou repoussés par l'aimant. Cette action, attractive ou répulsive, comprime le gaz contre la paroi du tube; la section devient plus étroite, le gaz s'échauffe davantage par le passage du courant et le spectre se trouve modifié.

Nous savons qu'on a attribué ces différentes modifications à des impuretés des gaz, ou à des causes inconnues; mais ces objections ne nous paraissent point rendre raison des phénomènes observés dans des circonstances très-différentes, et nous regardons comme certain que les gaz, et même les vapeurs métalliques, présentent différents spectres suivant leur température.

En général, les spectres du premier ordre sont peu brillants, et, par conséquent, ils ne se détacheraient pas d'une manière suffisante sur le fond lumineux du Soleil. De plus, si l'on excepte l'hydrogène, il faut une température très-élevée pour obtenir le spectre du second ordre, le seul qui présente des raies très-vives, analogues à celles des vapeurs métalliques; l'étincelle électrique, qui suffit pour produire le spectre des métaux, est rarement capable de communiquer aux gaz une température assez élevée pour qu'ils donnent un spectre brillant.

Il faut donc qu'un gaz soit porté à une température très-élevée pour que nous puissions reconnaître sa présence à la surface du Soleil, et il est bien possible que l'enveloppe extérieure ne soit pas assez chaude pour produire le spectre du second ordre. L'hydrogène lui-même donne, dans le Soleil, le spectre qui correspond à une température modérément

élevée; les raies terminées en pointe qu'on observe dans certaines circonstances montrent qu'il éprouve un refroidissement bien prononcé dans la couche la plus éloignée du centre et dans les protubérances. Dans ce cas, l'absorption, réduite à celle des spectres de premier ordre, est trop faible pour être sensible : elle donne simplement lieu à des bandes plus ou moins diffuses qu'il est impossible de distinguer d'un très-grand nombre des raies dues à des substances inconnues.

On ne peut cependant pas dire que l'oxygène fasse complétement défaut dans l'atmosphère solaire: nous avons reconnu dans les taches des traces de vapeur d'eau; il y a donc de l'oxygène. Il est possible que dans les régions les plus élevées l'hydrogène se refroidisse jusqu'à la température à laquelle il peut se combiner avec l'oxygène, température qui est certainement bien supérieure à 1500 degrés; la vapeur d'eau ainsi formée retomberait pour être décomposée par dissociation dans les régions plus basses; ses éléments s'élèveraient de nouveau et formeraient ainsi une véritable circulation. Il est également possible que l'azote se trouve dans l'atmosphère du Soleil, et qu'il donne naissance aux lignes sombres qui bordent la raie C à l'extérieur du disque, car cette raie doit lui appartenir, si elle n'est pas due au carbone. Peut-être faut-il attribuer à l'azote un grand nombre de *persiennes* qu'on observe dans l'intérieur des taches.

La spectrométrie est une science encore au berceau; il faut donc éviter de tirer de ses indications des conclusions précipitées.

M. Zöllner a donné une autre explication que nous allons exposer en peu de mots. En partant des principes de la théorie mécanique de la chaleur, il est arrivé par le calcul à cette conclusion que, en raison des poids spécifiques et des autres propriétés des différents gaz, en raison de la tempé-

rature très-élevée de la surface solaire, et à la légèreté spécifique de l'hydrogène, une atmosphère de ce gaz, capable de produire une pression de 180 millimètres, serait remplacée par une couche extrêmement petite d'oxygène et d'azote (1), et, comme ces gaz sont très-peu absorbants, il serait très-difficile de les reconnaître, tandis qu'une couche très-mince de vapeurs métalliques produirait un effet sensible à cause du grand pouvoir absorbant de ces substances.

On voit que la difficulté de se faire une idée de l'état physique du Soleil provient de l'ignorance dans laquelle nous sommes de la température qui existe à la surface de cet astre et de la pression que produit son atmosphère. Si nous parvenons à déterminer ces éléments, nous pourrons dire à coup sûr si l'on doit considérer la photosphère comme un gaz incandescent ou comme un brouillard lumineux; mais nous n'avons pas encore les données nécessaires pour trancher la question.

Pour faire toucher du doigt les difficultés qui se présentent à nous, proposons un simple problème. On demande quelle hauteur devrait avoir une couche de matière solaire pour produire une pression de 4070000 atmosphères. Nous prenons ce nombre parce que, d'après M. Zöllner, il représenterait la pression sous laquelle l'hydrogène deviendrait liquide (2). Si la couche capable de produire ce résultat avait dans toute son étendue la densité moyenne du Soleil 1,46,

---

(1) Les chiffres donnés par M. Zöllner sont, pour l'azote, $\frac{3,3^{mm}}{10^{74}}$ et, pour l'oxygène, $\frac{124^{mm}}{10^{11}}$. (Voir *Nuovo Cimento*, agosto 1870, et *Philosophical Magazine*, november 1870.)

(2) Cette liquéfaction n'est cependant qu'hypothétique, car M. Cailletet, en poussant la pression à 800 atmosphères, n'a rien aperçu qui indiquât une loi de compressibilité différente de celle que suivent les gaz parfaits.

elle devrait avoir une hauteur de 989010 mètres ; vue de la Terre, elle sous-tendrait un angle de 1″,383, quantité bien inférieure à la profondeur des taches. Nous avons déjà donné d'autres exemples de ces résultats, qui nous paraissent si extraordinaires, parce que nous les comparons malgré nous à ce qui se passe sur la petite planète que nous habitons.

Le Soleil est un monde si différent du nôtre, qu'on pourrait avec raison nous reprocher la témérité avec laquelle nous cherchons à étudier sa structure. Il ne faut cependant pas perdre courage ; depuis quelques années la science a fait beaucoup de progrès, et ceux qui viendront après nous ne manqueront pas de faire encore davantage.



LIVRE IV.

LES ÉCLIPSES.

CHAPITRE PREMIER.

PHÉNOMÈNES OBSERVÉS PENDANT LES ÉCLIPSES.

§ I. — *Historique.*

Les éclipses totales du Soleil étaient jadis un sujet de terreur pour les populations ignorantes et superstitieuses; elles sont devenues pour la science une source de renseignements précieux relativement à la constitution de l'atmosphère solaire. L'astre du jour, cessant alors d'illuminer notre atmosphère, nous permet d'étudier certains phénomènes, curieux et instructifs, très-utiles au but que nous nous sommes proposé. Nous ne pouvons donc pas négliger cette question; nous l'étudierons dans tous ses détails à la fois si complexes et si intéressants. Commençons par quelques notions générales qui sont absolument essentielles.

Les éclipses totales ont toujours été observées avec empressement et décrites avec enthousiasme; mais c'est depuis un tiers de siècle seulement qu'on les étudie d'une manière parfaitement rationnelle. Depuis cette époque, la perfection des Tables solaires et lunaires, l'exactitude des données géographiques ont permis aux astronomes de calculer d'avance,

d'une manière rigoureuse, la ligne que doit tracer sur notre globe le cône d'ombre projeté par la Lune, sa largeur exacte et la durée précise du phénomène. Alors seulement les astronomes ont pu se déplacer en toute sûreté pour aller observer les éclipses, sans s'exposer comme autrefois à perdre le fruit d'expéditions laborieuses.

L'observation des éclipses se réduisait naguère à la détermination de l'instant précis où avait lieu l'occultation; les résultats étaient utilisés pour corriger les Tables du Soleil et de la Lune, et pour connaître avec plus de certitude le rapport du diamètre de ces deux astres. Comme ces calculs se font presque aussi bien en prenant pour point de départ l'observation d'une éclipse partielle, il n'y avait pas un intérêt spécial à faire de longs voyages, afin de se trouver dans la zone de la totalité. Mais de nos jours, grâce aux découvertes récentes et à la perfection des moyens de recherche, on se propose avant tout d'étudier la physique solaire, et pour cela il est indispensable de se transporter dans cette zone privilégiée où l'occultation du Soleil est complète.

C'est en 1842 que, pour la première fois, l'attention des savants fut portée sur ce point. On observa des phénomènes qu'on n'avait pas soupçonnés jusqu'alors, et ce fut comme une révélation véritable; un horizon nouveau semblait s'offrir à la contemplation des savants, et l'on ne négligea aucun moyen pour l'étudier avec soin. Depuis cette époque, un grand nombre d'astronomes entreprirent simultanément des voyages, quelquefois bien longs, pour aller observer chacune des éclipses qui ont eu lieu. Ces voyages présentent de très-grands avantages. En multipliant le nombre des postes d'observation, et en les choisissant convenablement, on prévient les désagréments qui, pour un observateur isolé, peuvent si facilement résulter de l'état du ciel; mais surtout on peut

distinguer à coup sûr ce qui est accidentel, dans les phénomènes, de ce qui est indépendant des observateurs et des circonstances de l'observation; enfin une division intelligente du travail permet d'observer ces phénomènes aussi complétement que possible, malgré leur courte durée : aussi a-t-il suffi d'un petit nombre d'éclipses pour faire avancer rapidement l'étude de la constitution physique du Soleil; indiquons les principales.

1° Nous devons mettre en première ligne celle de 1842, qui fut observée en France par les astronomes français, en Italie par les Anglais et les Italiens, en Autriche par les Allemands. Arago a discuté ces observations dans un savant Mémoire inséré dans l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* pour 1846, et Baily en a donné une admirable description dans les *Memoirs of the R. Astr. Society*, t. XV, 1846.

2° L'éclipse de 1851 a été observée en Suède par les Anglais, les Allemands et les Russes; une collection précieuse d'observations a été publiée dans le tome XXI des *Mémoires de la Société astronomique de Londres*.

3° L'Amérique a fourni aussi son contingent : l'éclipse du 30 octobre 1853 a été observée par Moesta, celle du 7 septembre 1858 par Gillis et par les Brésiliens; celles de 1865 et de 1867 par le P. Cappelletti, l'astronome Moesta et quelques autres savants. Ces observations ont beaucoup contribué à assurer la généralité de certains phénomènes dont l'importance est devenue par là beaucoup plus grande.

4° En 1860, les astronomes les plus habiles de l'Europe s'étaient donné rendez-vous en Espagne; les observations nombreuses qui furent faites, et surtout les photographies qu'on obtint en deux points différents, font de cette éclipse l'une des plus importantes et des plus fertiles en conclusions.

5° Tous ces succès ont été surpassés le 18 août 1868

L'éclipse présentait une circonstance des plus favorables dans sa longue durée, six minutes vingt-cinq secondes : c'est presque la plus longue possible. C'est ce qui engagea les gouvernements à faire des dépenses considérables, et encouragea les savants à affronter les fatigues de longs et rudes voyages pour aller s'installer dans des pays à peine civilisés. Ces sacrifices ont reçu leur légitime récompense, comme nous le reconnaîtrons bientôt en étudiant les découvertes fécondes qui en ont été le fruit, principalement au point de vue des études spectrales.

6° L'éclipse du 7 août 1869 fut observée dans l'Amérique du Nord, surtout par les astronomes américains, et leurs observations, si remplies d'intérêt pour les savants, ont confirmé et généralisé les découvertes faites, en 1860, à l'aide de la photographie, et en 1868 par l'analyse spectrale.

7° L'éclipse du 22 décembre 1870, visible en Espagne, en Sicile, en Afrique et sur une grande partie des côtes de la Méditerranée, devait rivaliser avec celle de 1860 par le nombre des stations et par la facilité avec laquelle on pouvait les installer au milieu du monde civilisé : aussi organisa-t-on un grand nombre d'expéditions. Les Italiens s'établirent à Augusta, à Catane, à Reggio en Calabre. Les Anglais occupèrent Syracuse, Catane, Augusta, Cadix, Oran. Les Américains s'installèrent à Syracuse et à Xérès. La France, malgré la guerre qui la désolait, envoya M. Janssen en Afrique, et le savant astronome eut le courage de sortir de Paris en ballon, emportant avec lui tous ses instruments. Enfin les Portugais et les Espagnols devaient observer sur leur territoire.

Les instruments préparés étaient tous de premier ordre : c'étaient de grands équatoriaux mis en mouvement par des horloges, des spectroscopes, des polariscopes, de grands appareils photographiques, etc. Instruments et observateurs

avaient été transportés sur des navires de guerre, aux frais des divers gouvernements. Un grand nombre d'amateurs étaient venus, en outre, se partager les points les plus importants de la zone privilégiée. Malheureusement la saison était peu propice, et, en effet, une bourrasque qui envahit la Méditerranée au moment décisif ne permit qu'à un petit nombre de savants de faire des observations importantes, et encore ces observations furent-elles peu sûres, à cause du malheureux état du ciel.

8° Cet échec fut heureusement réparé l'année suivante. L'éclipse du 12 décembre 1871 fut visible dans les Indes, et, malgré la grande distance qu'il fallait franchir, elle fut étudiée par un grand nombre d'habiles observateurs. Ces derniers efforts furent couronnés du plus brillant succès; les efforts des savants et les dépenses généreusement faites par les gouvernements de l'Europe furent amplement récompensés. Ce succès est d'autant plus heureux que nous resterons bien des années sans avoir une occasion aussi favorable (¹).

Dans cet exposé, il nous sera impossible de suivre pas à pas chacune des relations que la science possède; nous en tirerons seulement ce qui sera utile à notre but, en nous appuyant principalement, pour ce qui concerne les phénomènes généraux, sur ce que nous avons observé nous-même en 1860 et en 1870. En 1860 nous étions installé dans des conditions très-favorables, au *Desierto de las Palmas*, sur le

(¹) Pendant que nous corrigeons cette épreuve, on fait les préparatifs pour l'éclipse du 5-6 avril 1875, qui sera visible aux Indes, surtout dans le royaume de Siam. Les astronomes partis pour les Indes afin d'y observer le passage de Vénus attendront cette circonstance propice, qui ne sera pas sans grand intérêt, car le Soleil est actuellement dans un état de calme comparativement aux époques des dernières éclipses, dans lesquelles les taches et les protubérances étaient bien plus nombreuses.

sommet du mont Saint-Michel, à une hauteur de 725 mètres au-dessus du niveau de la mer, sur un pic isolé d'où nous découvrions un horizon magnifique et très-étendu; le ciel y était d'une pureté admirable qui facilita beaucoup nos observations. Quant aux détails qui ne pourront pas trouver place ici, nous renverrons le lecteur aux Mémoires de notre Observatoire pour l'année 1863 et aux autres publications de l'époque; indiquons particulièrement la belle description de M. de la Rue, que nous citerons souvent, et qui se trouve dans les *Philosophical Transactions,* année 1862.

Pour les éclipses plus récentes, on consultera les Rapports des Américains publiés par M. Sands, et les nombreuses publications des journaux scientifiques de 1871 et 1872.

Outre nos propres observations, nous profiterons des communications orales qui nous ont été faites par les nombreux savants avec qui nous avons été en relation dans ces mémorables circonstances. Si nous agissons ainsi, ce n'est pas pour satisfaire le sentiment puéril de la vanité personnelle, mais afin de donner plus d'autorité à nos paroles et plus de vérité à nos descriptions.

§ II. — *Phénomènes généraux qu'on observe dans une éclipse totale.*

Une éclipse ne commence à présenter un intérêt vraiment sérieux qu'à partir du moment où le centre du Soleil est couvert par la Lune. La lumière commence alors à diminuer d'une manière très-sensible, et lorsque approche le moment de la totalité cette diminution est tellement rapide qu'elle a quelque chose d'effrayant. Ce qui frappe alors, ce n'est pas seulement l'affaiblissement de la lumière, c'est surtout le chan-

gement de couleur que présentent les objets. Tout devient triste, sombre et comme menaçant. Le paysage le plus vert se recouvre d'une teinte grise; dans les régions les plus élevées et les plus voisines du Soleil, le ciel prend une couleur de plomb, tandis que, auprès de l'horizon, il devient d'un jaune verdâtre. Le visage de l'homme présente une teinte cadavérique, analogue à celle que produit la flamme de l'alcool saturé de chlorure de sodium. Cette teinte jaunâtre, et surtout l'abaissement de la température, semblent accuser une diminution dans la puissance vitale de la nature.

En même temps, un silence général s'établit dans l'atmosphère : les petits oiseaux disparaissent, les insectes se cachent, tout semble présager un imminent et terrible désastre. On conçoit très-bien, dit M. Forbes, que les populations ignorantes soient saisies d'une immense frayeur en voyant ainsi pâlir l'astre du jour, et qu'elles se figurent assister au commencement d'une nuit éternelle. L'histoire nous fait connaître les terreurs qu'éprouvaient, en pareille circonstance, les peuples de l'antiquité, même les plus civilisés : telle fut l'impression signalée par le gouverneur d'Achaïe à Apollonius de Thyane (1). Le P. Faura nous dit que, pendant l'éclipse de 1868, des Chinois se jetèrent avec effroi dans des embarcations afin d'échapper au désastre; ils ne furent pas même rassurés par la présence des astronomes qui étaient là avec leurs instruments tout prêts à faire leurs observations.

Des circonstances secondaires, qui n'ont d'ordinaire aucune importance, contribuent quelquefois singulièrement à donner à ces impressions quelque chose de saisissant. Ainsi, en 1842, un nuage qui s'épanouissait à une petite distance

---

(1) PHILOSTRATE, *Vie d'Apollonius*, liv. VIII, chap. XXIII.

du Soleil paraissait aux yeux de M. Airy comme une masse énorme se précipitant sur la Terre avec une rapidité effrayante.

Tous les observateurs s'accordent pour décrire ces émotions. Nous-même, quoique mieux préparé que personne, nous fûmes saisi par un sentiment d'oppression et, disons-le, de frayeur involontaire; il fallut toute la puissance de notre volonté pour nous rendre maître de toutes nos facultés à la vue de ce phénomène imposant.

Tous les savants nous parlent dans leurs relations des impressions qu'on éprouve en observant pour la première fois une éclipse totale. Notre émotion a été moins grande la seconde fois, et il nous semble avantageux que, pour des opérations aussi délicates, l'observateur ne soit pas à son coup d'essai. Ces impressions dépendent cependant beaucoup des circonstances; elles sont bien plus fortes lorsque le ciel est sans nuage et que rien ne vient détourner l'attention de ce phénomène grandiose.

Lorsque l'observateur est favorablement placé, il lui est facile de suivre la marche de l'ombre totale qui s'avance comme un orage sombre et menaçant. De la hauteur du mont Saint-Michel, nous vîmes cette colonne noire envahir la plaine bien plus rapidement que ne peut le faire un orage, et avec une vitesse analogue à celle d'une locomotive lancée à toute vapeur.

Le capitaine Pistoïa, à Augusta, en 1870, vit cette ombre s'avancer et traverser le ciel brumeux avec la rapidité de l'éclair. M. Marchisio, du sommet du phare de Capo dell' Armi, en Calabre, la vit venir de l'Etna et traverser la mer avec une étonnante rapidité. Il paraît que ce mouvement est plus frappant lorsque le ciel est brumeux, car le bord du cône d'ombre est alors plus nettement tranché.

C'est dans cet instant surtout qu'on est frappé par le silence

solennel qui s'empare de la nature pendant cette nuit momentanée. Au *Desierto de las Palmas*, en Espagne, nous étions entouré d'une foule curieuse et bavarde, dont les conversations incessantes nous avaient bien contrarié pendant tout le jour; mais, lorsque approcha le moment solennel, tout devint tranquille, et nous pouvions compter les battements de notre chronomètre aussi facilement que nous l'aurions pu faire à minuit dans la solitude d'un observatoire. Tous les yeux et toutes les attentions étaient fixés sur le mince croissant du Soleil qui allait disparaître.

Dans ces derniers instants, le croissant diminue avec une rapidité surprenante; bientôt il est réduit à un mince filet terminé par des pointes très-aiguës; les proéminences du contour lunaire le divisent souvent en plusieurs parties; enfin il disparaît.

Aussitôt la scène change d'une manière subite et complète. Au milieu d'un ciel couleur de plomb se détache un disque parfaitement noir, entouré d'une gloire magnifique de rayons argentés, parmi lesquels scintillent des jets de flammes roses. Ce spectacle est à la fois terrible et sublime. Pour le faire mieux comprendre, transcrivons simplement la description naïve des impressions que l'astronome anglais Baily éprouva en 1842, alors que les savants étaient moins familiarisés avec ces phénomènes.

« J'étais, dit-il, tout occupé à compter les oscillations de mon chronomètre, afin de saisir l'instant précis de la disparition totale, plongé dans un silence profond au milieu de la foule qui se pressait dans les rues, sur la place et aux fenêtres des maisons, et dont l'attention était tout entière absorbée par le spectacle qu'elle contemplait. Tout à coup, le dernier rayon disparaît, et je suis assourdi par une explosion d'applaudissements et de cris (*evviva*) qui éclatent au milieu de

cette immense multitude. Toutes mes fibres s'électrisent, et un frémissement s'empare de moi; je regarde le Soleil, et je me trouve en face du spectacle le plus ravissant que l'imagination puisse créer. L'astre du jour était remplacé par un disque noir, noir comme la poix, environné d'une gloire brillante analogue à celle qu'on représente autour de la tête des Saints (*fig.* 106).

Fig. 106.



» A cette vue je demeurai saisi d'étonnement; je perdis une portion considérable de ces moments précieux, et je fus sur le point d'oublier le but de mon voyage. Je m'attendais bien, d'après les descriptions que j'avais lues, à voir autour du Soleil une certaine lumière, mais faible et crépusculaire; tandis que je voyais une auréole brillante dont l'éclat, très-vif sur le bord du disque, diminuait graduellement et disparaissait à une distance égale à peu près au diamètre de la Lune. Je n'avais rien prévu de semblable.

» Je fus bien vite revenu de mon étonnement, et je mis de nouveau l'œil à ma lunette, après avoir ôté le verre noir de l'oculaire. Une nouvelle surprise m'attendait. La couronne de rayons qui entourait le disque lunaire était interrompue en trois points par d'immenses flammes de couleur de pourpre dont le diamètre était d'environ 2 minutes. Elles paraissaient tranquilles et présentaient le même aspect que les sommets neigeux des Alpes éclairés par le Soleil couchant. Il me fut impossible de distinguer si ces flammes étaient des nuages ou des montagnes; pendant que je cherchais à les étudier pour en déterminer la nature, un rayon de Soleil brille dans les ténèbres, vient révivifier la nature, mais me plonge dans cette tristesse qu'éprouve une personne qui voit disparaître l'objet de ses vœux au moment où elle était sur le point de le saisir. »

Quelque habitude qu'on ait de ces phénomènes, l'impression qu'ils produisent sur l'observateur n'en est pas moins vive. Il est impossible de regarder avec indifférence ce disque noir qui remplace le Soleil, et l'auréole argentée qui l'environne, étalée sur un ciel couleur de plomb qui ne fait qu'augmenter le contraste.

L'obscurité qui règne au moment où l'éclipse est totale dépend beaucoup de l'état du ciel. En général, on peut la comparer à celle qui règne une demi-heure ou trois quarts d'heure après le coucher du Soleil, lorsqu'on ne voit encore que les étoiles les plus brillantes; mais ordinairement on aperçoit Vénus longtemps avant le moment de la totalité. Par un effet de contraste dû à la disparition rapide de la lumière, l'obscurité paraît plus grande qu'elle ne l'est en effet. En général, on peut lire un livre imprimé en gros caractères, mais il est impossible de distinguer nettement la graduation des instruments et de voir l'heure sur nee montre : aussi les observa-

teurs doivent-ils avoir des lampes allumées pour lire les chronomètres et les instruments gradués.

La couronne, lorsque le ciel est bien pur, a une étendue égale au diamètre de la Lune; mais elle ne brille d'un vif éclat que dans des limites bien plus restreintes. Elle laisse souvent échapper des rayons ou aigrettes d'une longueur considérable, dont nous aurons occasion de parler plus tard. Les flammes rouges sont souvent visibles à l'œil nu, et, au *Desierto,* les paysans disaient que le Soleil *avait du feu* (el Sol tiene fuego). Pendant l'éclipse de 1868, elles présentaient l'aspect de tours implantées sur la Lune; quelques observateurs, par une illusion d'optique, les prenaient pour des échancrures du disque lunaire.

Le premier rayon de Soleil fait disparaître toute cette scène magique; le Soleil brille alors comme une lampe électrique, projetant des ombres tranchées, mais dont les bords sont vacillants; on croit voir des ondes lumineuses se propager comme des bandes ondoyantes et serpentantes. La nature encore sombre semble reprendre sa gaieté ordinaire, le sentiment de tristesse qui s'était emparé de tous les spectateurs fait place à une impression douce et joyeuse.

On peut, pendant quelque temps, suivre la marche de l'ombre qui s'éloigne, et du sommet du mont Saint-Michel nous pûmes voir le cône sombre envelopper d'abord les îles Columbrètes, et se répandre ensuite sur la surface lointaine de la mer.

Telle est en peu de mots la scène que présente une éclipse totale. Les descriptions qu'on en a faites sont souvent exagérées, mais cette exagération même est une preuve de l'impression profonde qu'éprouvent tous les spectateurs. Quoique prévenus par les écrits de leurs devanciers, les observateurs de la dernière éclipse ont éprouvé les mêmes émotions; les

savants ont beaucoup de peine à faire leurs travaux et à se détacher de la contemplation passive du grand spectacle que leur offre la nature. M. de la Rue nous disait, et il l'a imprimé dans son Mémoire, qu'à la première occasion il se déplacerait volontiers pour aller contempler une autre éclipse, mais en simple amateur et sans instruments, afin de jouir à son aise des impressions qu'il a été obligé de maîtriser en 1860.

Terminons ici cet aperçu général, et entrons dans la discussion des détails scientifiques qui ont pour nos lecteurs et pour nous un intérêt tout particulier.

§ III. — *Phénomènes qui accompagnent la disparition et la réapparition du Soleil dans les éclipses totales.*

Avant de disparaître complétement, le Soleil se réduit d'abord à un mince croissant terminé par des pointes très-aiguës. Au dernier moment, ce filet est souvent découpé par les sommets des montagnes qui se trouvent sur le bord lunaire, et l'on peut prévoir ce phénomène d'après la forme du contour de la Lune que l'on voit depuis longtemps se projeter sur le Soleil. Si les montagnes sont nombreuses, le filet se brise en donnant naissance à une foule de points brillants qui ressemblent à des grains de chapelet. Cette apparence est due à plusieurs causes. Elle dépend en partie d'un phénomène d'irradiation dont les effets sont encore exagérés par les défauts de la lunette, ou par l'imperfection de la mise au point. Entrons dans quelques détails.

Lorsque nous regardons un corps très-lumineux, il nous paraît toujours plus grand qu'il ne l'est réellement. Ainsi éclairons vivement une carte découpée comme l'indique la *fig.* 107; elle nous présentera l'apparence indiquée par la

fig. 108; la partie blanche paraît dilatée en sorte qu'au centre les angles qui se touchent réellement paraissent détachés l'un de l'autre.

Tout le monde connaît le phénomène curieux de la lumière cendrée qui se présente dans les premiers jours de la nouvelle Lune; outre le croissant vivement éclairé par le Soleil, on distingue nettement le reste du disque faiblement éclairé; mais, par un effet d'irradiation, le croissant semble appartenir à un disque plus grand que celui de la Lune. Cet effet de l'irradiation, très-considérable à l'œil nu, est beaucoup réduit dans une lunette; mais il n'est jamais complétement détruit.

Fig. 107.



Fig. 108.



On a encore attribué à la même cause un phénomène important qui rend difficile l'observation du passage des planètes sur le Soleil. Supposons qu'on cherche à déterminer l'instant précis du second contact intérieur. La planète se détache très-nettement comme un petit cercle noir sur le disque brillant du Soleil. Elle est encore à une certaine distance du contour, lorsque l'observateur voit se former un cordon ou ligament noir (*fig.* 109) qui va en s'élargissant de plus en plus jusqu'au moment où les deux disques semblent tangents intérieurement. L'observateur reste donc incertain du moment précis où a eu lieu le contact, ne sachant s'il doit noter le moment où s'est fermé le filet noir (*fig.* 109), ou celui du contact apparent (*fig.* 110).

Tout devient facile à expliquer si l'on remarque que le Soleil, par un effet d'irradiation, ou par quelque autre cause semblable, doit nous paraître plus grand qu'il ne l'est en réalité. Il est limité, non par son contour apparent, mais par un cercle d'un plus petit diamètre, que nous indiquons par une ligne ponctuée. Lorsque la planète arrive à cette limite, le contact a réellement lieu, tous les rayons lumineux venant de cette région du Soleil sont interceptés, et le filet noir doit

Fig. 109.

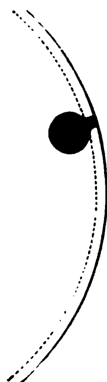
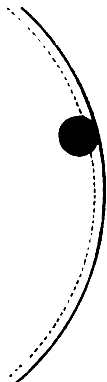


Fig. 110.



se former. Les mêmes phénomènes ont dû se produire en sens inverse au premier contact intérieur. Ainsi donc, pour les contacts intérieurs, ce qu'il faut observer avec soin, c'est à l'entrée le moment où le filet noir se brise, à la sortie celui où il se forme. Le P. Hell a soigneusement remarqué ces phénomènes en 1769, dans son observation du passage de Vénus; il a noté fort heureusement les différentes époques où le bord du disque parut entamé, celles où se forma et celles où se brisa le cordon noir, ce qui a donné un excellent moyen de déterminer le moment de l'entrée réelle. Les observations du P. Hell avaient été décriées, mais pour des motifs étran-

gers à la science, Les discussions de M. Littrow et de M. Faye ont prouvé qu'elles sont exactes, et M. Faye a été jusqu'à dire : « Il nous sera difficile de faire mieux en 1874 ».

A l'occasion du dernier passage qui a eu lieu le 8-9 décembre 1874, on a apporté la plus grande attention à ces phénomènes, mais les résultats ne sont pas encore assez connus pour que nous puissions donner ici ces conclusions. Cependant, d'après les travaux préliminaires exécutés à l'Observatoire de Paris et à celui de Greenwich, il paraît que ces apparences tiennent plus à des défauts de la lunette qu'à un phénomène d'irradiation. C'est ce qui explique que certains observateurs les ont constatées pendant que d'autres n'ont rien vu de semblable (1).

Ce qu'on observe pour les planètes se vérifie aussi pour la Lune pendant les éclipses. Soient *a*, *b*, *c* (*fig.* 111) une série

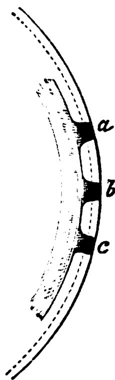
---

(1) Le P. Hell fait remarquer avec raison que, des quatre contacts qui ont lieu au passage d'une planète sur le Soleil, on ne peut utiliser que les deux qui ont lieu à l'intérieur du disque solaire. Dans les deux autres, comme on ne voit pas la planète, on ne peut apprécier le contact qu'après qu'il a eu réellement lieu. Nous avions annoncé que pour les prochains passages on pourrait aussi tirer parti des deux contacts extérieurs, en employant la combinaison hélioscopique spectrale que nous avons indiquée précédemment. Avec cette combinaison, on voit la chromosphère rouge qui entoure le Soleil et l'image directe du Soleil, et l'on pourrait profiter du moment où la planète entame cette couche rose pour préparer l'observation et prendre avec précision l'instant exact du contact avec le bord solaire. En employant ce procédé, nous avons pu voir la Lune avant qu'elle entrât sur le disque du Soleil dans l'éclipse du 25 mai 1873.

Quelle que soit la perfection des lunettes que l'on construit actuellement, le phénomène des *grains de chapelet* qu'on observe dans les éclipses semble prouver qu'elles donnent au disque solaire un diamètre exagéré. Il est maintenant prouvé que l'hélioscope spectral permet d'éviter ce grave inconvénient, et il y aurait alors un double avantage à l'employer. Rappelons que ce système est différent de celui qu'on avait proposé avant nous; l'ancien produit de telles déformations qu'il ne permet pas d'observer les bords du disque et des taches; avec le nôtre, au contraire, on peut distinguer les plus petits détails aussi bien qu'avec un verre coloré, et le champ est aussi grand qu'on le veut.

de proéminence lunaires; lorsqu'elles arriveront au bord véritable du Soleil indiqué par la ligne ponctuée, elles devront former une série de filets noirs; l'anneau apparent se trouvera ainsi séparé en plusieurs parties, qui prendront facilement la forme de grains irrégulièrement arrondis, si aux circonstances que nous venons d'indiquer vient s'ajouter une certaine imperfection dans la lunette ou dans la mise au point. Ces grains sont bien connus sous le nom de *Baily's beads,* ou

Fig. 111.



chapelet de Baily, du nom de l'astronome anglais qui les a signalés le premier.

Dans notre observation au *Desierto,* nous avons vu les pointes très-effilées du croissant se briser, mais sans que les fragments offrissent l'apparence des grains de chapelet; cela tient à l'absence de longues chaînes de montagnes, mais aussi à l'excellente lunette de Fraunhofer que nous avons employée. M. de la Rue a fait les mêmes remarques, et tous les observateurs sont unanimes à reconnaître que ces illusions diminuent beaucoup lorsqu'on a soin de mettre exactement au point en faisant mouvoir de temps en temps l'oculaire, à cause des

variations de la longueur focale des lunettes, variations qui sont dues aux changements de température. Elles sont, en particulier, très-sensibles avec les tubes en métal, et il faut y faire bien attention, surtout pour les photographies.

Pour bien étudier la disparition du croissant il faut que l'oculaire soit garni d'un verre gradué ([1]), et l'on doit le tenir à la main afin de pouvoir en modifier la position, et l'enlever au dernier instant. On reconnaît alors que la lumière est très-faible auprès du bord. Ainsi, en regardant par la partie moyenne de notre verre, nous aurions jugé que le Soleil était disparu, tandis qu'il était encore très-visible dans la partie la plus mince. Deux ou trois secondes avant la disparition totale, nous vîmes la couronne encore très-pâle, mais nettement formée.

Le dernier filet lumineux ne disparut pas avec cette instantanéité qu'on observe dans l'occultation des étoiles; il disparut graduellement, et il nous fut bien difficile d'évaluer la fraction de seconde. Au moment où je jugeai l'occultation complète, j'enlevai le verre coloré, mais il restait encore un filet de lumière si vif, que j'en fus un instant ébloui. Il disparut cependant assez vite pour que je pusse continuer mon observation, et je le vis se transformer peu à peu en un arc de lumière rose terminé par une infinité de pointes. Celles-ci furent éclipsées à leur tour au bout de *six secondes*, et alors parurent les protubérances ou flammes rouges.

Ces détails de notre observation sont conformes à ceux qui ont été donnés antérieurement par M. Airy, et plus tard par le P. Cappelletti et M. Stephan. M. Airy, en 1842, était accompagné d'un observateur qui regardait à l'œil nu, et qui

---

([1]) *Voir* p. 34.

était chargé de l'avertir du moment où le Soleil serait sur le point de disparaître. Mais, lorsqu'on lui donna le signal dont on était convenu, M. Airy avait déjà noté l'instant de la disparition : aussi, ayant enlevé le verre noir de la lunette, il fut frappé par un vif rayon de lumière. MM. Stephan et Tisserand virent quelque chose de semblable dans l'observation qu'ils firent aux Indes en 1868. Voici comment ils s'expriment : « Le deuxième contact ne fut pas suivi d'une disparition brusque de toute lumière vive. Après la disparition du bord du Soleil, la Lune nous parut encore comme bordée d'un contour lumineux peu épais, d'un quart de minute environ, d'un éclat presque comparable à celui du Soleil. Cet anneau est tellement brillant qu'il peut induire en erreur sur l'existence véritable du contact. »

Le P. Cappelletti dit à son tour, à propos de l'éclipse qu'il observa au Chili, le 25 avril 1865 : « Pendant la totalité, la Lune était entourée d'un anneau (anillo) d'un quart de minute environ; autour de cet anneau se trouvait la couronne » (*fig.* 112).

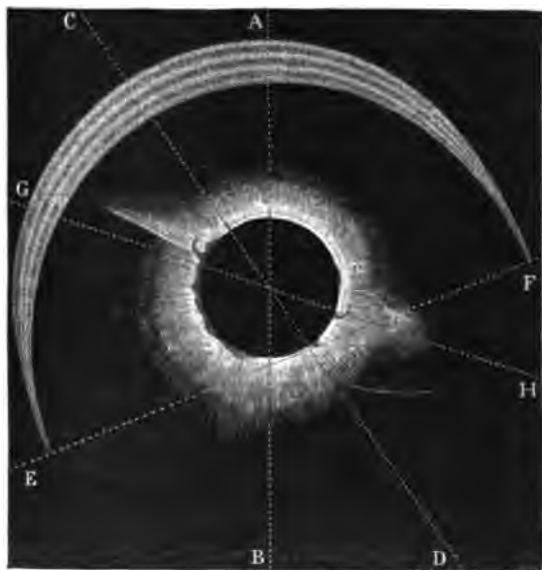
Cet anneau a été également signalé à Mantawalok en 1868. Nous avons observé les mêmes apparences en Sicile pendant l'éclipse de 1870; après avoir enlevé le verre noir, nous vîmes encore une lumière très-vive, malgré la présence d'un nuage qui se précipitait rapidement sur le Soleil et le couvrit quelques secondes plus tard.

Nous pourrions ajouter d'autres témoignages, mais ceux que nous venons de citer suffisent pour montrer qu'il y a entre la photosphère et la couronne une couche très-brillante que nous retrouverons également dans les photographies.

Comme cette couche brillante est bordée de lumière rose, il est évident qu'on ne peut pas faire abstraction de la teinte du

verre coloré qu'on emploie, lorsqu'on veut comparer différentes observations, qu'il s'agisse des éclipses, du passage des planètes ou des mesures ordinaires. Pour noùs en assurer, nous avons mesuré le diamètre du Soleil en employant successivement un verre bleu et un verre rouge, et nous avons trouvé une différence de deux secondes environ.

Fig. 112.



Pour résoudre complétement cette question, nous avons pris le diamètre solaire avec le spectroscope, soit avec notre système de prisme additionnel placé en avant de la fente, soit avec le spectroscope ordinaire. Nous l'avons toujours trouvé plus petit de $0,5^s$ à $0,6^s$, ce qui correspond à un arc de 7 à 11″.

Dans la dernière observation du passage de Vénus, M. Tacchini a confirmé d'une manière éclatante le résultat de nos observations. En observant au spectroscope, il a noté la sortie de la planète *deux minutes* plus tôt que les autres ob-

servateurs qui employaient les méthodes ordinaires Il y a donc une différence considérable dans la valeur que l'on trouve pour le diamètre solaire, suivant qu'on observe avec une lunette ordinaire ou avec un spectroscope. Deux éclipses ont été observées au spectroscope, l'une par M. Lorenzoni, l'autre par nous; dans les deux cas, il y eut un retard pour le commencement de l'éclipse, tandis que la fin fut avancée : le diamètre solaire paraît donc plus petit lorsqu'on observe au spectroscope.

De tout ce que nous venons de dire il résulte que le Soleil n'est pas limité par un contour géométrique nettement défini ; sur ses bords il y a une région où la lumière s'éteint rapidement, mais graduellement, et cette région a une étendue de quelques secondes, comme nous le constaterons encore par la photographie. Le spectroscope nous apprend qu'une portion de cette bande appartient à la chromosphère, et que la photosphère a un diamètre notablement plus petit.

A la réapparition du Soleil, les phénomènes se reproduisent en sens inverse; mais quelques-uns d'entre eux sont alors plus faciles à saisir, l'œil n'étant plus, comme au commencement, ébloui par la lumière. Par exemple, on distingue plus nettement le bord dentelé, de couleur rose, qui environne le disque; on peut même continuer à voir les protubérances et la couronne quelques instants après la réapparition du Soleil. En 1860, M. de la Rue put voir une protubérance avant la totalité, en regardant le Soleil par réflexion sur une glace non étamée : M. Bruhns en vit une deux minutes après que l'éclipse eut cessé d'être totale, et les mêmes phénomènes ont été observés depuis en différentes occasions. D'ordinaire, cependant, les protubérances ont une lumière beaucoup plus faible que celle de l'enveloppe rose, car elles ne deviennent visibles que quand celle-ci est éclipsée.

Nous parlerons plus tard de la nature et des formes des protubérances; qu'il nous suffise, pour le moment, de signaler une illusion d'optique qui s'est produite assez souvent, et dans laquelle l'imagination joue un grand rôle. Comme le mouvement de la Lune dévoile successivement chacune de ces flammes, plusieurs observateurs ont cru qu'elles se formaient en effet sous leurs yeux. Nous savons maintenant que les protubérances existent indépendamment de l'éclipse: l'obscurité ne fait que les rendre visibles.

Un peu avant la fin de la totalité, la couronne devient généralement plus vive dans la partie du Soleil qui est sur le point de reparaître, et l'on voit se former un arc rose, d'une étendue considérable, embrassant à peu près un sixième du contour solaire. Schumacher le vit avec une étendue de 90 degrés; le P. Cappelletti n'en vit qu'une longueur de 50 à 60 degrés. Cette étendue dépend de la différence des diamètres apparents de la Lune et du Soleil; lorsqu'on la connaît, on peut calculer la hauteur de la couche rose, et c'est ainsi qu'on l'a évaluée à 15 ou 20 secondes. En Espagne cet arc occupait une étendue de 60 degrés. Comme j'observais sans verre coloré, il arriva un moment où la lumière devint trop vive; je retirai l'œil de la lunette, et en ce moment même le Soleil apparut; il brillait au milieu du ciel comme une lampe électrique. La couronne fut encore visible pendant vingt-cinq secondes, et même, en cachant avec la main la partie brillante, je pus la distinguer pendant quarante-cinq secondes [1]. Les ombres étaient parfaitement tranchées, mais vacillantes.

---

[1] Ces données pourraient servir à évaluer le pouvoir éclairant de la couronne; car, au moment où elle disparaît, son intensité lumineuse est égale à celle du faisceau de rayons qui part du Soleil.

Il importe de remarquer qu'avant la réapparition du Soleil l'éclat de la lumière me força à retirer l'œil de la lunette ; cet éclat ne provenait pas du bord du Soleil lui-même, mais seulement de cette couche très-brillante qui se trouve immédiatement au-dessus de la photosphère. Ce fait et une foule d'autres observations montrent qu'à la fin comme au commencement on remarque une gradation rapide, mais sensible, de la lumière entre la couche rose et la photosphère.

§ IV. — *Phénomènes physiques observés pendant la totalité.*

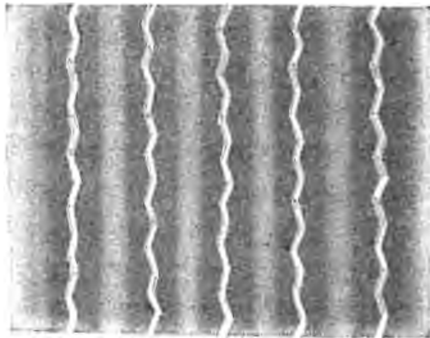
L'occultation du Soleil est toujours accompagnée d'un abaissement sensible de température et d'une foule d'autres phénomènes qui sont très-intéressants à étudier.

Beaucoup d'observateurs ont remarqué de grandes oscillations au bord du Soleil, au moment de sa réapparition. Le P. Cappelletti dit qu'elles lui rappelaient les vagues de l'Océan au cap Horn. La cause de ce phénomène se trouve certainement dans notre atmosphère, et non dans le Soleil lui-même. Le refroidissement anormal qu'elle vient de subir occasionne souvent des brouillards, des nuages, quelquefois même des halos, comme on l'a observé au Chili (*fig.* 112). Ce phénomène s'est reproduit à Augusta, en Sicile, pendant l'éclipse de 1870. Les nuages placés à une petite distance du croissant solaire et fortement illuminés donnèrent naissance à de magnifiques irisations dont la netteté allait en augmentant à mesure que le croissant devenait plus mince. Les nuages irisés ne sont pas rares, même en dehors des éclipses ; mais la grandeur du disque qui les éclaire est un obstacle à la netteté des teintes développées par les interférences. La surface éclairante diminuant à mesure qu'on s'approche de la totalité,

on se trouve dans des conditions assez semblables à celles qu'indique la théorie pour la production de ces phénomènes. L'arc irisé observé à Augusta avait environ 6 degrés de diamètre; la couleur rouge était à l'extérieur, le bleu à l'intérieur.

Les brouillards et les nuages sont à craindre, surtout dans la saison froide, où l'air est déjà dans un état voisin de la saturation; peu de temps après l'occultation, la température

Fig. 113.



s'abaisse d'une manière assez sensible pour que l'air soit saturé, et la vapeur d'eau se précipite sous forme de brume. C'est ainsi que se produisirent les nuages qui nous empêchèrent de mieux réussir les observations que nous avons faites à Augusta.

La disparition et l'apparition du Soleil sont accompagnées d'ombres vacillantes et de franges lumineuses qui paraissent traverser l'horizon. Cette observation a été faite dans beaucoup d'éclipses, mais surtout en 1842 et en 1860. Tout dernièrement, le P. Faura, à Mantawalok, a cherché à représenter le phénomène par le dessin que nous reproduisons dans la *fig.* 113; mais il faut remarquer que ces lignes ser-

pentantes n'ont pas réellement la régularité qu'on leur a donnée dans le dessin.

Pour faire cette observation, le P. Faura avait étendu sur le sol une grande feuille de papier blanc sur laquelle se détachaient les lignes ondulées qu'il a essayé de reproduire. Ces bandes ont été observées aussi dans les deux dernières éclipses. Les professeurs Costa et Seguenza, près de Messine, les virent courir sur un mur blanc : ils ont trouvé que le dessin du P. Faura représente bien le phénomène ; d'après leur évaluation, elles pouvaient avoir de 6 à 8 centimètres de large. M. Legnazzi, à Terranova, en Sicile, vit les mêmes bandes se produire sous ses yeux, mais avec moins de régularité. Du haut du phare de Capo dell' Armi, très-près de la ligne de la totalité, M. Marchisio vit venir de l'Etna l'ombre lunaire bordée de franges ayant environ 1 mètre de largeur apparente. On observa le même phénomène à Messine, en dehors de la zone de la totalité, mais très-près de ses limites ; les observateurs éprouvèrent la même impression que si l'éclipse fût devenue totale pendant un instant, ce qui ne pouvait avoir lieu. A Reggio, en Calabre, dans la zone de la totalité, mais très-près du bord, les ondes produisirent, en passant, la même sensation que si la Terre avait éprouvé un mouvement d'oscillation : hommes et chiens en furent effrayés. M. Escandon, à Xérès, a vu les bandes ondulées traverser le spectre qu'il observait en ce moment. M. Oudemans les a observées dans la dernière éclipse, mais avec une forme différente de celle qui est représentée dans le dessin du P. Faura.

Quoi qu'il en soit, tous les observateurs sont d'accord sur les points suivants : 1° les bandes existent réellement ; 2° elles ont une grandeur apparente variable, suivant la distance de l'objet sur lequel elles sont projetées ; 3° elles sont animées d'un mouvement d'oscillation très-rapide ; 4° elles accom-

pagnent l'ombre et paraissent principalement sur son contour; elles s'inclinent de manière à être tangentes au point du croissant solaire qui disparaît le dernier.

Ces phénomènes ont été constatés par un assez grand nombre d'observateurs pour qu'on ne puisse pas douter de leur existence, mais il est bien difficile d'en donner une explication satisfaisante. On a voulu les attribuer à la diffraction; ils seraient produits par l'interférence des rayons qui rasent le bord du disque lunaire; mais cette théorie est en contradiction avec les principes de l'Optique. D'abord, pour produire des bandes d'interférence, il faut que le bord du corps opaque (la Lune dans ce cas) soit éclairé par un point lumineux placé derrière lui, tandis que le Soleil a un diamètre de $\frac{1}{2}$ degré. De plus, dans la diffraction, on n'observe que trois ou quatre franges, régulièrement colorées, dont l'intensité va en décroissant depuis la première jusqu'à la dernière. Ici rien de pareil : on a compté jusqu'à dix, douze et vingt franges, et généralement elles ne sont pas toutes colorées.

Il n'est donc pas probable qu'elles proviennent d'une interférence proprement dite, mais elles peuvent bien résulter, comme la scintillation des étoiles, d'une oscillation des rayons lumineux. Le point, ou plutôt la ligne rayonnante, c'est le mince croissant du Soleil. Les changements dans la température de l'air et les variations de densité qui en résultent produisent un déplacement alternatif des rayons, les renforçant en un point pour les affaiblir en un autre. C'est ainsi que M. Escandon, à Xérès, a vu des bandes semblables se projeter sur un mur placé devant lui, pendant qu'il tournait le dos à une montagne placée à distance et au-dessus de laquelle apparaissait le Soleil levant. Nous avons vérifié en partie cette observation; mais les bandes que nous avons aperçues étaient

loin d'avoir le parallélisme régulier qu'on attribue à celles des éclipses. Cette irrégularité peut cependant tenir aux conditions atmosphériques, et si le phénomène a été si saillant en Sicile pendant l'éclipse de 1870, il faut peut-être l'attribuer à la grande agitation de l'air causée par le violent orage qui fondit sur l'Etna. Les bandes vues à travers le spectre solaire semblent confirmer cette explication, car elles étaient semblables à celles qui traversent les spectres stellaires auprès de l'horizon.

Ces franges sont plus frappantes et plus faciles à observer près des bords de la zone où l'éclipse est totale, et même en dehors de ses limites. C'est que, dans ces régions, le croissant solaire conserve plus longtemps une faible épaisseur, tandis que dans les régions centrales de la totalité cet état ne dure qu'un instant.

Quoique cette explication nous paraisse exacte, nous attendrons cependant, pour nous faire une opinion définitive, qu'on nous donne des descriptions plus précises que celles qui ont été faites jusqu'à présent, et c'est pour cela que nous attirons sur ce point l'attention des observateurs.

Nous avons déjà dit qu'on voit l'ombre de la Lune s'avancer à la surface de la Terre. Nous avons rapporté les observations de Forbes et de M. Marchisio. Le capitaine Pistoia, qui observait l'éclipse de 1870 sur la citadelle d'Augusta, nous a donné la description suivante : Lorsque le Soleil s'éclipsa complétement, on aperçut dans le ciel une bande obscure dirigée du sud-ouest au nord-est; on la vit disparaître rapidement : sa teinte était sombre, mal terminée sur les bords et comme estompée (*sfumata*), de sorte que, dans la direction du nord-ouest au sud-est, le ciel présentait cet aspect froid et jaunâtre qu'on observe en hiver au coucher du Soleil. Cette bande s'avança rapidement au-dessus de la tête de l'ob-

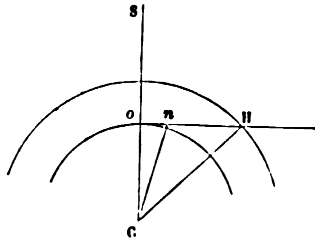
servateur vers le nord-est. Avant l'apparition du Soleil, on vit à l'angle sud-ouest paraître une espèce d'aurore; la bande sombre avait alors l'aspect représenté dans la *fig.* 114 : il

Fig. 114.



paraît qu'un ciel brumeux et voilé est plus propre à faire remarquer ce phénomène

Fig. 115.



Il est facile de se rendre compte de cet aspect crépusculaire. Pendant l'éclipse, l'observateur est éclairé, non-seulement par la couronne, mais aussi par la lumière qui illumine au loin l'horizon. Supposons que le Soleil soit au zénith au point S (*fig.* 115), *o* étant la position de l'observateur. Me-

nons une horizontale qui rencontrera en H les limites de l'atmosphère; le rayon *on* de l'ombre lunaire, vu du centre C de la Terre, ne sous-tend guère qu'un angle de 1 degré, même dans une éclipse de six minutes de durée, tandis que la longueur *o*H sous-tend au moins 7 degrés. Donc, au point *o*, l'observateur sera éclairé par la partie de l'atmosphère située au dessus de *n*H; mais cette lumière sera nécessairement très-faible, car elle provient d'une partie assez restreinte du Soleil, et, de plus, elle tombe sur une région élevée et, par conséquent, raréfiée de l'atmosphère. De là cette coloration jaune que présente l'horizon : c'est qu'il est éclairé seulement par les bords du Soleil, dont la teinte, ainsi que nous l'avons vu précédemment, est d'un jaune fuligineux.

Le capitaine Buffa a mis en évidence cette teinte jaune par une expérience intéressante. Il exposa en plein air une bande de papier sur laquelle étaient peintes les couleurs du spectre solaire; à mesure que le Soleil s'éclipsait, il vit disparaître progressivement les couleurs les plus réfrangibles; quelques instants avant la totalité, le violet, l'indigo et le bleu étaient devenus invisibles, tandis que les autres couleurs étaient voilées par une teinte sombre. Il arriva au même résultat avec des étoffes bleues et jaunes : les premières étaient presque invisibles, tandis que les autres étaient simplement voilées. La même chose arrive au coucher du Soleil, car on voit alors le violet et le bleu disparaître avant les autres couleurs. Tous ces phénomènes s'expliquent facilement par la théorie que nous venons d'exposer.

CHAPITRE II.

DE LA COURONNE.

§ I. — *Apparences générales.*

Le phénomène qui frappe le plus, lorsqu'on observe une éclipse à l'œil nu, c'est l'auréole brillante qui entoure la Lune et qui a reçu le nom de *couronne*. Les anciens l'avaient remarquée, et ils en avaient conclu que l'éclipse n'est jamais totale. Nous lisons dans Plutarque le passage suivant : « La « Lune, encore que quelquefois elle cache tout le Soleil, elle « (l'éclipse) ne dure pas tant de temps, ni n'a pas telle lar- « geur, ains apparaît toujours autour de sa circonférence « quelque lueur, qui ne permet pas que les ténèbres soient « bien noires et profondes et parfaitement obscures (¹). »

Les observateurs la mentionnent toujours comme un phénomène extraordinaire et constatant avec certitude l'existence d'une atmosphère lunaire; mais nous sommes certains maintenant qu'il faut en chercher la cause dans le Soleil lui-même.

L'observation la plus ancienne où l'on trouve ce phénomène décrit avec quelques détails remonte à l'année 1239; elle est citée par Muratori (*Ann. Re. Ital.*, t. XIV, col. 1097). Le chroniqueur dit qu'on vit un cercle autour du Soleil, avec

(¹) *Opera moralia. De facie in orbe Lunæ.* Traduction d'Amyot

un trou enflammé dans la partie inférieure ([1]). Il s'agit sans doute d'une protubérance. Clavius l'observa aussi à Coïmbre le 21 août 1560, et il en parle avec surprise.

La première description faite d'une manière scientifique est due à Wassenius, qui observa le 2 mai 1733; il remarqua en même temps les flammes rouges que nous appelons maintenant les protubérances, et les regarda comme des nuages flottant dans l'atmosphère de la Lune. A partir de cette époque, tous les observateurs sont d'accord dans leurs descriptions. C'est toujours une auréole formée de rayons divergents; ces rayons partent d'un anneau qui environne la Lune, dont l'éclat très-vif, d'un blanc argentin ou nacré, s'étend à une distance variable avec les circonstances atmosphériques, mais ordinairement égale au diamètre lunaire.

On a essayé d'évaluer l'intensité lumineuse de la couronne, mais les résultats obtenus sont très-différents les uns des autres. C'est qu'en effet il est bien difficile de faire une semblable évaluation, à cause des variations extraordinaires et exceptionnelles que présente la lumière dans une éclipse. Ce qui est certain, comme nous l'avons déjà noté, c'est qu'en 1860 nous avons pu distinguer la couronne quarante secondes après la réapparition du Soleil. On peut même, sinon la voir, au moins constater son existence pendant un temps beaucoup plus considérable, six ou sept minutes environ avant et après la totalité. En effet, si l'on projette sur un écran l'image du Soleil, on voit qu'en dehors du disque solaire on distingue encore nettement la silhouette de la Lune jusqu'à une distance considérable. Cela tient à ce que le disque lunaire tranche par son obscurité complète sur la région voisine du Soleil où se développe l'auréole.

([1]) Quoddam foramen erat ignitum in circulo Solis ex parte inferiori.

D'après notre évaluation, le pouvoir éclairant de la couronne ne doit pas être inférieur à celui que possède la pleine Lune dans les circonstances les plus favorables, par exemple en hiver, lorsqu'elle est pleine et très-près du zénith. En effet, l'éclat de la Lune permet de voir les étoiles de première et même de seconde grandeur, tandis que pendant les éclipses on distingue à peine les plus brillantes. Ce qui fait alors paraître les ténèbres si affreuses, c'est la rapidité avec laquelle elles se produisent.

Il ne faut cependant pas oublier que, pendant la totalité, l'observateur est éclairé, non-seulement par la couronne, mais par la lumière qui provient des parties lointaines de l'air atmosphérique.

L'éclat de la couronne dépend beaucoup de l'état de l'atmosphère. Sous le beau ciel des Indes, pendant l'éclipse de 1868, sa lumière était très-belle, et à sa clarté on pouvait facilement lire des caractères de moyenne grandeur. En 1842, pendant que Baily observait à Paris une couronne très-brillante, M. Airy la voyait très-pâle à Turin, où le ciel était brumeux. En 1851, à Gottembourg, en Suède, elle était très-belle, tandis qu'à Lilla-Edet, en Suède également, elle était faible et peu étendue.

Plusieurs savants, entre autres M. Janssen dans son expédition de 1871 aux Indes, ont été si frappés du brillant éclat de la couronne, qu'ils ont cru devoir en conclure que la cause de ce phénomène est certainement dans le Soleil. Il n'y a là rien qui doive surprendre les personnes qui ont été comme nous témoins de ce spectacle sous le beau ciel de l'Espagne.

A part ces différences, dues à la transparence de l'air, on peut toujours distinguer dans la couronne trois régions bien définies, quoique les lignes de séparation ne soient pas nettement tranchées. La première est une zone très-vive ayant 3 ou 4 minutes de largeur, possédant la couleur et l'éclat de

l'argent. Autour de cette première zone s'en trouve une seconde dont la lumière présente une gradation très-rapide, et dont le bord extérieur se confond avec le ciel. Enfin de la

Fig. 116.

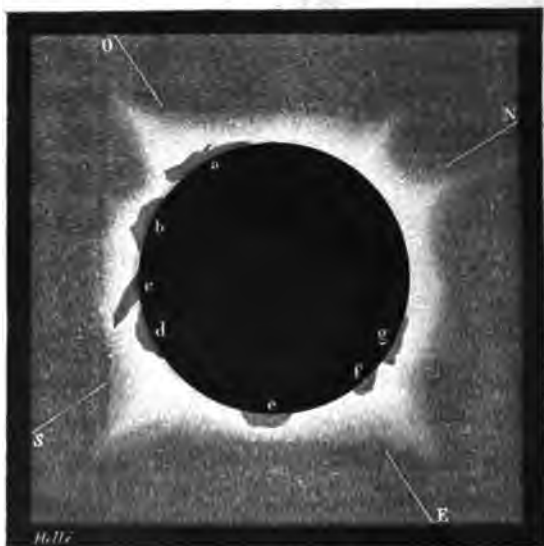


première partent un certain nombre d'aigrettes lumineuses, composées de lignes brillantes entrelacées, et dont la longueur, variable suivant les circonstances, atteint quelquefois le double du diamètre de la Lune.

La *fig.* 116 montre l'aspect de la couronne telle que nous

l'avons observée au *Desierto de las Palmas*, en 1860; mais cet aspect est loin d'être constant dans une même éclipse, et il varie encore beaucoup plus d'une éclipse à l'autre. Il suffit, pour s'en convaincre, de comparer ce dessin à celui de Baily (*fig.* 106) et à celui du P. Cappelleti (*fig.* 112). Nous en verrons d'ailleurs d'autres exemples.

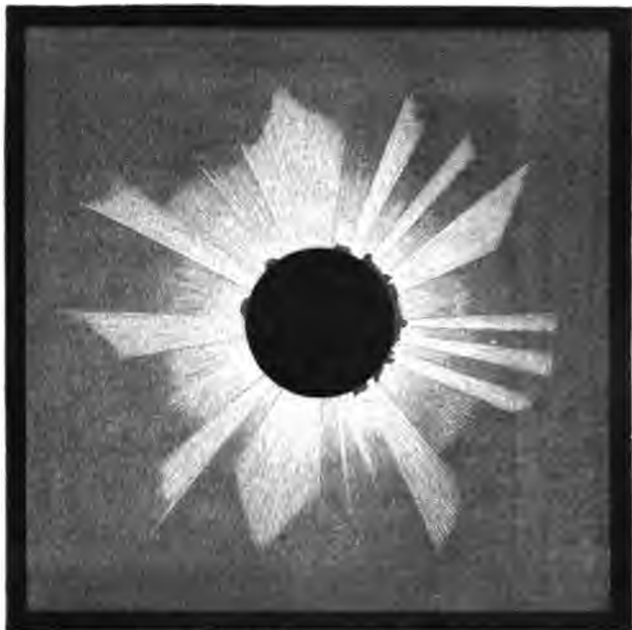
Fig. 117.



Dans les éclipses postérieures, on a fait une attention particulière à ces apparences, afin d'en découvrir la cause. Dans les observations faites, en 1869, aux États-Unis, la plupart des dessins donnés par les différents astronomes peuvent se ramener à un type commun, dont ils s'écartent fort peu : c'est une espèce de carré grossièrement ébauché, ayant des aigrettes aux angles. La *fig.* 117 présente la forme observée par M. Eastman, à Des Moines. M. Gould, à Burlington, observa d'abord une forme semblable; mais, deux minutes plus tard, il la trouva singulièrement modifiée.

Dans les figures précédentes, la zone brillante qui entoure immédiatement le disque de la Lune possède une largeur assez considérable. Il n'en fut pas de même en Sicile, en 1870 : cette partie annulaire était très-étroite, de sorte que les rayons semblaient partir du bord même de la Lune. La *fig.* 118 re-

Fig. 118.



produit le dessin exécuté par M. Tacchini, d'après l'observation qu'il fit à Terranova. Ce dessin est assez d'accord avec la description donnée par le P. Serpieri. Les rayons sont nombreux, nettement détachés les uns des autres, situés sur le prolongement du diamètre de la Lune ; ils vont en se rétrécissant, à leur extrémité, en forme de pointe. Mais il y eut, pour cette éclipse, une grande variété de dessins, et les différences furent si grandes, qu'on fut conduit à se demander si

les apparences décrites et représentées par les différents observateurs ne dépendaient pas de la structure et de la disposition particulières de leurs yeux. Rappelons cependant que le ciel était très-troublé et le Soleil assez peu élevé au-dessus de l'horizon; par conséquent, si les apparences n'étaient pas les mêmes, il faut en chercher la cause dans notre atmosphère. Dans l'éclipse observée aux Indes en 1871, il y a plus de ressemblance entre les différents résultats, et les principaux rayons, situés sur le prolongement du diamètre, ont été vus par plusieurs observateurs dans les mêmes positions avec les mêmes formes.

Lorsqu'on fait ces observations à la hâte et à l'œil nu, il est difficile qu'elles soient parfaites. Si l'on se sert de lunettes, les résultats obtenus par plusieurs observateurs pourront être très-différents les uns des autres. Si l'on emploie un fort grossissement, la couronne paraîtra beaucoup moins large, composée d'un simple anneau étroit, diffus et sans rayons (Maclear). Pour avoir une idée exacte de ce phénomène, on doit l'observer avec une lunette ayant un champ considérable et un faible pouvoir amplifiant.

Nous ne pouvons reproduire ici tous les dessins que possède la science; mais nous ne pouvons laisser de côté celui que M. Liais a fait au Brésil. Il nous a paru très-bizarre au premier abord, mais très-intéressant, comme nous le verrons bientôt. On y remarque (*fig.* 119) quatre feuilles principales, presque normales au bord du disque lunaire. Quelques autres, moins importantes, sont inclinées et accompagnées de nuages suspendus entre les rayons. Le P. Serpieri parle de quatre coupes renversées, observées dans l'éclipse de 1870, et dont la forme rappelle celle de ces feuilles. Le dessin de M. Liais présente au premier abord un aspect étrange, mais nous verrons bientôt qu'il a un mérite singulier.

§ II. — *Différentes régions dont se compose la couronne.*

La première et la plus vive de ces régions, c'est l'anneau brillant qui se trouve immédiatement en contact avec la photosphère, et la matière rose paraît être en suspension dans

Fig. 119.



cette couche elle-même. Son éclat est tellement vif, qu'il peut occasionner des doutes sur le moment précis de la totalité (Cappelletti, Stéphan, Tisserand, etc.). Lorsque les circonstances atmosphériques sont favorables, cet anneau, quoique très-affaibli, possède encore un éclat remarquable. On peut évaluer sa largeur à 15 ou 20 secondes.

Autour de cette première couche, et en contact immédiat avec elle, se trouve une autre région où la lumière est encore assez vive, dans laquelle se produisent les protubérances, et qui s'étend jusqu'à une distance de 4 ou 5 minutes. Elle est d'un blanc d'argent, et tellement brillante, qu'elle présente un aspect nacré. Quelques observateurs parlent de couches de lumière; mais cette expression n'est pas exacte, car l'intensité lumineuse varie par gradation insensible, sans qu'on puisse assigner de limite précise entre les différentes couches.

La couronne est parfaitement concentrique au Soleil; les apparences qu'elle présente pendant l'éclipse ne permettent pas d'en douter, car elle est beaucoup plus brillante dans la partie où le Soleil est plus voisin du bord lunaire. On ne peut donc plus l'attribuer à l'atmosphère de la Lune, et il faut nécessairement la regarder comme appartenant au Soleil.

Au-dessus de cette région commence l'auréole proprement dite; elle est souvent irrégulière, et son contour, loin d'être uniforme, comme on l'avait supposé d'abord, présente souvent des inégalités et quelquefois même des cavités très-profondes. Plusieurs observateurs avaient déjà fait cette remarque, et surtout Gillis en Amérique, où il étudia l'éclipse de 1858. Les parties les plus brillantes correspondent en général au voisinage des protubérances et à la base des aigrettes. En 1870 et en 1871, on a observé dans certains endroits des cavités très-profondes, des espèces d'interruptions qui arrivaient presque jusqu'au bord du disque lunaire; c'est ce que les Anglais appellent *rifts :* leur position a été déterminée avec assez d'exactitude par les observations optiques et surtout par les photographies. On les trouvera représentées dans les dessins que nous reproduisons un peu plus loin.

On ne peut pas beaucoup compter sur les observations optiques pour apprécier exactement ces particularités. D'abord

il est toujours difficile d'évaluer l'intensité d'une lumière dans ces circonstances, surtout lorsqu'il n'y a pas de contour nettement tranché. En second lieu, ces observations sont faites à la hâte, les savants étant occupés à des choses bien plus importantes. Souvent même les dessins sont faits grossièrement, de mémoire, lorsque l'éclipse est terminée. Le seul moyen d'avoir des mesures exactes, c'est la photographie, et nous allons exposer les résultats obtenus par ce procédé.

§ III. — *Photographies des éclipses. Étendue de la couronne.*

En 1860, deux expéditions s'occupèrent, pour la première fois, de photographier l'éclipse : M. Warren de la Rue à *Rivabellosa*, et nous au *Desierto de las Palmas*, en compagnie de l'expédition espagnole qui était dirigée par M. Aguilar.

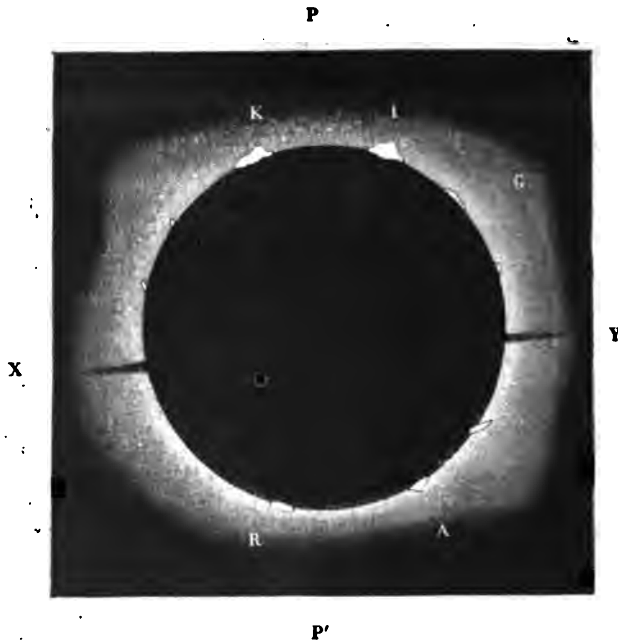
Les photographies de M. W. de la Rue, obtenues en grossissant l'image du Soleil avec l'oculaire, reproduisirent admirablement les protubérances et leurs accessoires ; mais la couronne n'y est visible que dans sa partie la plus brillante et la moins élevée. Nous avons, au contraire, photographié l'image directe donnée par l'objectif, ce qui donne une plus grande quantité de lumière et un champ plus étendu. Tous les observateurs ont depuis employé ce procédé, car il présente de grands avantages, sans aucun inconvénient, puisqu'on peut toujours obtenir ensuite des épreuves agrandies. Les photographies que nous avons exécutées reproduisent la couronne dans tout son éclat ; nous les conservons toujours, et, dernièrement encore, nous les avons étudiées en détail.

Nous reproduisons dans la *fig.* 120 une épreuve que nous avons obtenue en quarante secondes. La ligne XY représente la position d'un fil tendu dans la lunette et destiné à donner

l'orientation de la figure. L'axe polaire du Soleil est dirigé suivant PP'.

Une étude, même superficielle, de cette épreuve montre que la couronne n'a pas la même étendue dans toute sa circonférence. Dans les régions polaires, elle est plus étroite, et

Fig. 120.



sa hauteur atteint à peine la moitié de celle qui correspond aux régions équatoriales. La différence de niveau qui existe entre ces régions ne se produit pas par une gradation continue et insensible; mais, à une distance d'environ 30 degrés des pôles, on remarque une variation qui est incompatible avec toute loi de continuité. Il y a en ces points des dépressions considérables, puis le contour se relève d'une manière irrégulière et rapide jusqu'à environ 45 degrés de l'équateur. Le

maximum absolu correspond à cette dernière position, et non à l'équateur proprement dit, quoiqu'il y ait là aussi de grandes variations ; mais ici les irrégularités du contour ne présentent ni symétrie ni règle précise.

Les taches blanches représentent les protubérances; elles sont diffuses et semblent pénétrer dans l'intérieur du disque lunaire : c'est le résultat d'une longue exposition, d'abord à cause du déplacement de la Lune, et surtout à cause de la diffusion de l'action chimique. Quant à l'intensité de la lumière, on peut aussi remarquer qu'elle n'est pas la même dans toutes les régions, et qu'elle n'est pas toujours plus grande dans les parties où la couronne est plus étendue. La comparaison de nos différentes épreuves nous donne le moyen d'apprécier comment varie cette intensité suivant la distance au bord du Soleil. Ainsi une exposition de six secondes nous donna à peine une trace de la couronne; une exposition de douze secondes nous donna une étendue plus considérable; en quarante secondes nous avons obtenu l'image de l'auréole dans toute son étendue.

Tous ces résultats furent confirmés, en 1868, par les photographies obtenues dans les Indes par le major Tennant; mais une des plus belles épreuves est due à M. Whipple, qui observait l'éclipse du 7 août 1869 à Shelbyville, au Kentucky. C'est cette photographie que nous reproduisons dans la *fig.* 121. Elle est d'une netteté extraordinaire; outre les différences de hauteur, qui y sont aussi bien accusées que dans nos observations du *Desierto*, on y remarque des courbures très-prononcées, qui correspondent à de véritables jets lumineux, dont l'importance est très-grande. Dans la région polaire, sur un rayon de 15 à 30 degrés, la couronne a une élévation peu considérable; puis elle se soulève brusquement en formant des panaches curvilignes, dont la convexité est

tournée vers les pôles. Il y a partout des irrégularités frappantes; mais, en quatre régions, situées à environ 45 degrés de l'équateur, on remarque des maxima bien prononcés.

La *fig.* 122 représente la couronne, telle qu'elle a été photographiée à Cadix, le 22 décembre 1870, par les astronomes américains. Un léger brouillard a enlevé à l'image la netteté

Fig. 121.



qu'elle aurait dû avoir, et, de plus, la petitesse du diaphragme a limité l'étendue de l'auréole dans les régions équatoriales. Le bord nettement tranché qui la termine dans ces parties montre avec évidence qu'elle n'y est pas représentée tout entière, tandis qu'au pôle elle est bien complète, puisqu'il reste un intervalle entre elle et le diaphragme. Vers l'ouest, il y a une cavité très-prononcée, qui fait ressortir la courbure des rayons émanant de la couronne. Dans tous les autres points

où il y a des solutions de continuité, l'effet du brouillard a été trop considérable pour qu'on puisse reconnaître ces détails. A Syracuse, M. Brothers a obtenu une épreuve dans laquelle on observe des cavités assez semblables à celles de la *fig.* 122; mais, comme elle a été prise vers la fin de la totalité, l'image de la couronne est très-excentrique; et d'ailleurs le brouillard

Fig. 122.

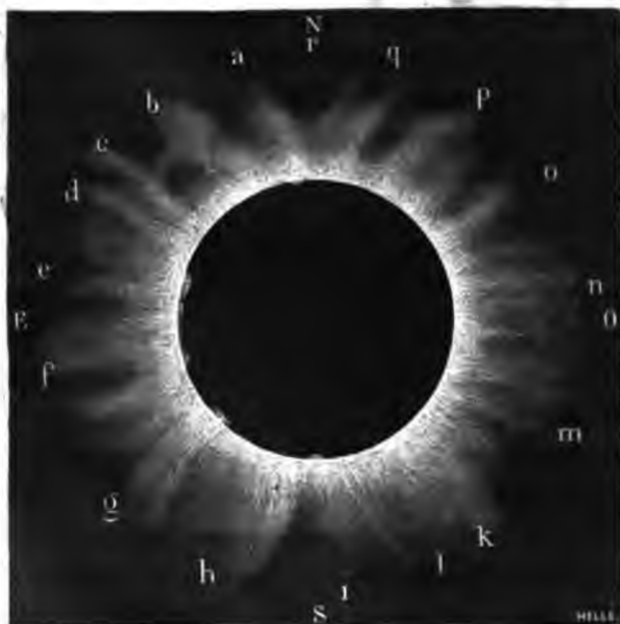


qui régnait au moment de l'observation ne permet pas d'attacher une grande importance aux détails.

La couronne est donc moins élevée dans les régions polaires, sur une étendue de 50 ou 60 degrés; mais est-ce un fait accidentel ou une loi constante? Cette question présente un grand intérêt, et, à ce point de vue comme à beaucoup d'autres, nous attachons le plus grand prix aux épreuves photographiques de M. Davis, que lord Lindsay avait envoyé

à ses frais dans les Indes pour y observer l'éclipse du 12 décembre 1871. Lord Lindsay a fait reproduire sur verre les photographies agrandies de M. Davis; puis, ces épreuves sur verre étant mises dans un stéréoscope, il en a fait exécuter un dessin qu'il a publié et que nous mettons sous les yeux

Fig. 123.



du lecteur (*fig.* 123). Nous reviendrons plus tard sur ce dessin pour discuter les détails qu'il représente avec tant de netteté.

Les figures originales sont un peu ovales. Ce résultat est dû au mouvement de la Lune qui, en se déplaçant, découvre à l'est une partie nouvelle de la couronne, tandis qu'à l'ouest elle en recouvre une partie égale, mais qui a déjà produit une

impression suffisante sur le cliché. La puissance actinique de la lumière est si grande auprès du bord, qu'il lui suffit d'un temps très-court pour produire une impression complète : la Lune peut bien recouvrir cette région, mais elle ne peut pas effacer l'image qui existe déjà. Il en résulte que son disque paraît moins large dans la direction de son mouvement, ce qui donne une figure ovale.

M. Davis a pu faire cinq épreuves successives pendant la totalité ; mais, dans la première et dans la cinquième, la distribution des aigrettes est un peu excentrique. La courbure des rayons est facile à constater dans toutes ces images, mais on voit que les arcs des pôles sont inégaux : celui du sud est beaucoup plus large que celui du nord. Ces photographies, comme toutes les précédentes, nous montrent que la plus grande hauteur de la couronne correspond, non à l'équateur, mais à une latitude élevée.

Les épreuves de lord Lindsay offrent une particularité très-curieuse : la première et la cinquième, mises ensemble dans un stéréoscope, produisent un relief très-surprenant. Dans chacune des deux images, la Lune est ovale, et elle paraît parfaitement ronde dans le stéréoscope. Les rayons se détachent derrière la Lune et, les deux figures se complétant l'une l'autre, on distingue parfaitement leur structure saillante et compliquée. Le grossissement de l'appareil, combiné avec la transparence délicate des épreuves, fait ressortir les moindres détails. C'est d'après ce relief stéréoscopique que lord Lindsay a fait exécuter le dessin que nous reproduisons dans la *fig.* 123. Malgré tous les efforts que nous avons faits pour rendre ce dessin aussi exact que possible, nous devons avertir le lecteur qu'il est loin de reproduire l'effet optique des photographies sur verre. Nous y attachons une si grande importance que nous croyons devoir l'analyser en détail.

Ce qui frappe d'abord l'attention, ce sont les ouvertures *arq* et *hil* que laissent entre eux les rayons qui tournent leur convexité vers les pôles. Cette courbure est nettement prononcée, et on la retrouve sur chacune des cinq photographies : ce n'est donc pas le résultat de la vision stéréoscopique. Nous voyons dans le cadran nord-est ([1]) trois rayons *a*, *b*, *c*. Il est évident qu'au point *c* il y a deux rayons superposés, ou du moins il y a une branche qui se tourne vers le point *b*, formant ainsi une feuille dans l'intérieur de laquelle on aperçoit le rayon *b* en forme de fer de lance. Au milieu de tous ces rayons sont suspendus de petit nuages, *d*, trop légers pour que le dessin puisse bien les représenter.

Vers l'est, dans la région équatoriale, nous voyons une branche ramifiée *e*; sa forme nous rappelle des observations faites pendant les éclipses précédentes. On avait aperçu des rayons semblables, mais on les attribuait à une illusion d'optique : tels sont, par exemple, le *bois de cerf* vu au *Desierto* par M. Cepeda, les crochets observés par Struve, etc.

Nous voyons ensuite une branche droite *f*, avec deux ramifications dirigées vers le sud, l'une plus grande et sensiblement recourbée, l'autre plus petite et presque droite.

Les rayons suivants, *g* et *h*, dans le cadran sud-est, forment une courbe dont les concavités sont dirigées l'une vers l'autre; il en résulte une espèce de feuille semblable à celles qui ont été observées au Brésil par M. Liais.

Dans la direction du pôle sud, on remarque la grande ouverture *i* qui fait le pendant de celle du nord; ces deux cavités nous avaient fait deviner la direction de l'axe polaire avant de connaître l'orientation de la figure.

([1]) Le lecteur remarquera que, sur la *fig.* 123, l'ouest se trouve placé à droite et l'est à gauche.

Dans le cadran sud-ouest nous voyons les rayons curvilignes *l* et *k*, qui embrassent entre eux deux masses très-brillantes et forment par leur ensemble une autre espèce de feuille. Du côté de l'ouest il y a deux faisceaux de rayons, *m*, *n*, très-légèrement recourbés et presque perpendiculaires à l'équateur, indiquant une autre feuille : un nuage léger est suspendu entre eux.

Enfin, dans le cadran nord-ouest, nous trouvons les rayons *o*, *p*, *q* formant une feuille très-bien circonscrite, qui complète le contour jusqu'à la grande ouverture *r*. Si l'on veut examiner sans parti pris le dessin de M. Liais et le comparer à celui que nous venons d'examiner, on reconnaîtra qu'il y a entre les deux des points de ressemblance bien frappants. On doit comprendre que, dans un examen rapide qui n'a pu durer que quelques instants, M. Liais n'a pu faire une étude parfaite comme celle que nous faisons à tête reposée sur une photographie.

On commettrait donc une grande erreur si l'on admettait encore, après tous les détails que nous venons de donner, que la couronne se compose d'un anneau peu épais et parfaitement uniforme, comme on la voit dans les lunettes puissantes. Ces instruments, vu leur pouvoir amplifiant, sont incapables de faire voir un objet peu lumineux; ils anéantissent, pour ainsi dire, la partie de la couronne la plus extérieure qui est moins lumineuse, et qui contient les détails irréguliers que nous venons de décrire; ils ne laissent voir que l'anneau brillant qui entoure immédiatement le Soleil, dont la composition est à peu près homogène, comme l'indiquent les photographies elles-mêmes. La couronne ne se voit donc bien qu'à l'œil nu, ou avec un faible grossissement; et, même alors, il est bien difficile d'en étudier les détails, car l'œil, passant brusquement de la vive lumière du jour à une

obscurité assez grande, n'est pas capable de distinguer des nuances aussi délicates : on ne peut les étudier à coup sûr qu'en les fixant par la photographie.

M. Maclear a déjà fait cette remarque, car, ayant observé successivement avec deux lunettes, il trouva qu'avec la plus faible la couronne présentait la même forme qu'à l'œil nu, tandis qu'avec l'autre, qui avait un pouvoir considérable, elle se réduisait à un anneau mince et uniforme (1). Du reste, au témoignage de tous les observateurs, l'homogénéité cesse à une distance du Soleil égale à 5 ou 6 minutes, et, en réalité, la plupart des ramifications que nous venons de décrire ne sont nettement sensibles qu'à une distance encore plus grande.

§ IV. — *Des aigrettes.*

Nous appelons *aigrettes* ces longs panaches rectilignes qui se détachent de l'auréole, semblables aux rayons de lumière qui sortent entre les nuages lorsque le Soleil est près de l'horizon.

Si les observateurs sont peu d'accord pour fixer les limites de l'auréole, ils le sont bien encore moins par rapport à ces aigrettes qui s'en échappent et se prolongent souvent à des distances considérables. Les descriptions diffèrent d'une éclipse à l'autre, et pour une même éclipse il semble que le phénomène ait été différent suivant la station d'où il a été observé. Comme cette question est intéressante, nous l'examinerons avec soin, afin d'engager les astronomes à l'étudier attentivement dans les prochaines éclipses.

---

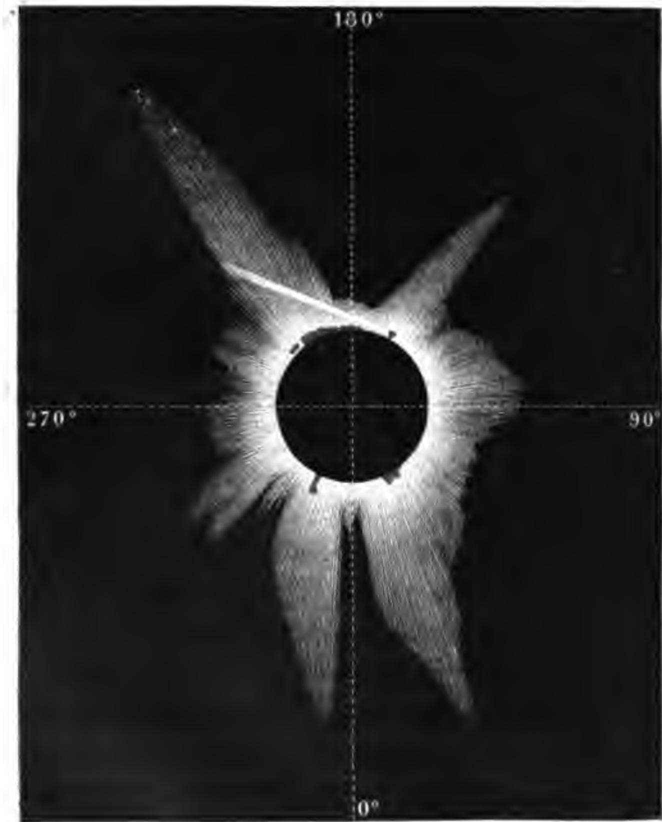
(1) Voir *Revue scientifique*, et *Month. Not. R. Astr. Society.*

Dans les observations anciennes, on s'est borné à nous indiquer l'existence des rayons divergents, en évaluant grossièrement leur étendue. En 1842, les descriptions furent détaillées, mais encore assez défectueuses. A Turin et à Pavie, Airy et Baily ne font aucune mention de ce phénomène. A Milan, Picozzi et Magrini aperçurent deux faisceaux de rayons. Dans la France occidentale, on signala également deux faisceaux opposés. Arago vit près du point culminant de la Lune une large tache lumineuse formée de jets entre-croisés qu'il comparait à un écheveau de fils entrelacés; Peytal les comparait à un paquet de chanvre. D'autres observateurs remarquèrent que le prolongement de ces rayons ne passait point par le centre du Soleil, ni par celui de la Lune, et que plusieurs étaient recourbés. A Toulon, on distingua trois faisceaux; les deux principaux étaient sur la ligne d'entrée et de sortie de la Lune. Petit en vit également trois, ainsi que Struve, qui leur assigna une longueur de 1°,5.

On le voit, ces relations sont confuses et contradictoires. Il est impossible de reconnaître d'une manière précise s'il s'agit des franges de l'auréole ou de véritables aigrettes. Nous retrouvons la même incertitude pour l'éclipse de 1851 et pour les suivantes. En 1860 nous n'observâmes ce phénomène que très-rapidement, vers le milieu de l'éclipse. Les aigrettes, dont nous avons donné le dessin, nous parurent tranquilles comme les rayons qu'on voit entre les nuages au coucher du Soleil. M. Cepeda, qui observait près de nous, vit un rayon ramifié comme un bois de cerf; mais peut-être cette observation se rapporte-t-elle, ainsi que les suivantes, à la région de l'auréole. M. Fielitzch, à Castellon de la Plana, non loin du *Desierto*, vit deux jets lumineux qu'il comparait aux branches d'une lyre. M. Struve, à Pobes, vit cinq rayons bien tranchés : l'un d'eux était recourbé en forme de crochet.

Le 29 août 1867, M. Grosch vit deux grandes masses de rayons dans la direction de l'équateur solaire, et une double aigrette renversée près du pôle.

Fig. 124.



En 1868, on vit aux Indes de grandes irrégularités dans la couronne, mais nous manquons de détails précis. La *fig.* 124 a été dessinée par le capitaine Bullock, qui conduisit à Mantawalok les professeurs du collége de Manille. On y remarque surtout un rayon transversal, qui parut seulement deux mi-

nutes après la totalité et persista jusqu'à la fin. Sa direction est oblique par rapport aux autres rayons qui parurent dès le commencement. Ce dessin se recommande par sa grande exactitude, car il a été contrôlé par d'autres dessins exécutés à la chambre noire. On n'a jamais réussi à photographier les aigrettes; c'est pour suppléer à cette impuissance de la photographie que les professeurs de Manille ont imaginé le procédé suivant. Ils préparaient d'avance des feuilles sur lesquelles étaient esquissées l'éclipse et l'auréole; de cette manière, en introduisant ces feuilles dans la chambre noire, on pouvait en fort peu de temps tracer avec exactitude les figures correspondant aux différentes phases.

Nous devons rappeler ici le dessin curieux que le P. Cappelletti exécuta au Chili en 1865 (*fig.* 112, p. 320). Le rayon principal était loin d'avoir une forme symétrique, et il différait complétement des autres. Sa lumière était blanche et très-vive; l'un de ses bords était nettement terminé, tandis que l'autre était diffus et allait en s'évanouissant progressivement. Enfin le P. Cappelletti fait observer que ce rayon si remarquable correspondait à la principale des protubérances. En général, si l'on étudie sur les dessins des observateurs la distribution des aigrettes, on y reconnaîtra à peu près la forme d'un carré ou d'un hexagone dont les angles correspondraient aux points les plus élevés de l'auréole. Lorsque le ciel est suffisamment pur, il y a une ressemblance assez grande entre les dessins faits par différents observateurs pendant une même éclipse. Il n'en est pas de même lorsque l'air est troublé, car alors il y a des différences très-considérables. Nous avons déjà donné (*fig.* 118) le dessin exécuté par M. Tacchini à Terranova en 1870; il est assez d'accord avec le phénomène observé à Capo dell' Armi par le P. Serpieri; mais la ressemblance est loin d'être parfaite.

Tels sont, en résumé, les renseignements que nous possédons sur ces curieux appendices. Quelle est leur cause? Faut-il la chercher dans le Soleil, dans la Lune ou dans notre atmosphère? Après un long examen, nous sommes convaincu que leur cause première est dans le Soleil, mais que leurs apparences peuvent être notablement modifiées par la présence de la Lune et par les circonstances atmosphériques.

Afin de nous faire comprendre plus facilement, nous rappellerons une expérience très-facile à répéter, et que nous avons faite à l'occasion de l'éclipse d'Espagne. Qu'on fasse au volet d'une chambre obscure un trou grossièrement arrondi, dont les bords aient des dentelures; qu'on le ferme imparfaitement à l'aide d'un bouchon, et qu'on fasse passer à travers les interstices un faisceau de rayons solaires. En regardant de côté, on verra une série de rayons parallèles; mais, si l'on place l'œil sur l'axe même du faisceau, on verra une couronne de rayons divergents s'étendant à une grande distance des trous. L'expérience réussirait également si l'on fermait un trou parfaitement rond avec un bouchon échancré sur son contour. Cette apparence est un simple effet de perspective, analogue à celui qui produit les rayons que l'on observe entre les nuages auprès du Soleil couchant. Cette expérience nous montre qu'une échancrure très-petite peut donner naissance à un rayon d'une très-grande longueur; cette longueur serait encore bien plus grande si l'air était rempli de poussière ou de fumée d'encens.

Appliquons ces résultats aux phénomènes qui se produisent pendant les éclipses. Le Soleil peut donner naissance à des rayons semblables, soit par ses protubérances, soit par les parties les plus brillantes de la couronne, qui agiront autour de la Lune comme les échancrures du volet agissent autour du bouchon; mais on se tromperait complétement si l'on ju-

geait des dimensions de la masse lumineuse qui produit ce phénomène par l'étendue du rayon que l'on aperçoit. Cette étendue dépend beaucoup du pouvoir réflecteur de l'atmosphère et surtout de la position de l'observateur. Une masse lumineuse, dépassant le contour de la Lune de quelques secondes seulement, peut, suivant l'éclat qu'elle possède, éclairer l'atmosphère terrestre à une profondeur considérable, et cette *profondeur* se traduira par une *longueur* proportionnelle du rayon visible. La Lune elle-même, avec son profil dentelé, contribuera à la production du phénomène en laissant passer des faisceaux lumineux plus ou moins larges, plus ou moins nettement terminés. La forme des rayons dépendra surtout de la position de l'observateur; les effets de parallaxe auront une influence très-considérable, et, à quelques kilomètres de distance, on pourra voir la couronne et ses rayons sous des aspects très-différents.

Enfin l'atmosphère terrestre n'est pas toujours susceptible d'être également éclairée dans tous ses points; car, en certains endroits, elle est plus transparente; en d'autres, elle est plus chargée de vapeurs : de là résulteront des lignes capricieuses, produisant un effet analogue à celui des rayons lumineux qui traversent une chambre obscure, lorsqu'on soulève de la poussière sur leur passage. L'analyse spectrale nous apprend que, si l'air atmosphérique est peu transparent, on observe les raies propres des protubérances à une grande distance du Soleil, et jusque sur le disque de la Lune. Rien n'est plus facile à comprendre : la seule lumière qui arrive dans cette direction jusqu'à l'observateur vient nécessairement de la couronne et des protubérances; mais elle est réfléchie et diffusée par l'atmosphère, et le spectroscope doit révéler sa présence dans tous les points voisins.

Telles sont les idées générales que nous proposons pour

expliquer le phénomène des aigrettes, et il nous semble que, si l'on veut les contrôler par les données des observations, on reconnaîtra qu'elles sont exactes et applicables au sujet qui nous occupe.

Si nous examinons les dessins donnés par les différents observateurs, nous trouverons qu'ils s'accordent le plus souvent à donner aux rayons la direction des principales protubérances, surtout dans la région de l'équateur et dans celle des taches. Le P. Cappelletti a fait cette remarque, et elle est assez bien vérifiée par les dessins de Moesta en 1853, de Gillis en 1855, et par les nôtres mêmes, quoique nous ne prétendions pas à une très-grande exactitude. Cette coïncidence est parfaite dans les dessins de Bullock.

En 1860, M. Plantamour observa la couronne et la dessina trois fois, au commencement, au milieu et à la fin. Dans le premier dessin, outre la couronne, il a tracé trois faisceaux de rayons correspondant aux protubérances dans la région d'entrée; dans le second, il y a cinq faisceaux, deux à l'est, trois à l'ouest; enfin, dans le troisième, il y a également cinq faisceaux, mais ils se trouvent tous dans la région de sortie et correspondent aux nombreuses protubérances qui parurent dans cette région à la fin de l'éclipse.

Cette observation est d'accord avec celle de Mantawalok, où le capitaine Bullock vit, deux minutes après la totalité, se former un rayon oblique dirigé vers l'une des protubérances. D'autres observateurs, entre autres Pope Hennessy, assurent que ces rayons paraissaient animés d'un mouvement facile à constater. Ce mouvement apparent s'explique aisément si l'on se rappelle que la Lune, en changeant de position d'un instant à l'autre, fait également varier la position des parties éclairantes par rapport à l'observateur.

Reste à expliquer la forme courbe que possèdent certains

rayons. Quelques-uns sont très-courts et ne s'étendent pas au delà des limites de l'auréole; nul doute que ceux-là n'appartiennent réellement au Soleil. Pour les plus longs, on peut encore faire une large part à notre atmosphère, en admettant, comme nous l'avons déjà dit, que ces courbes dépendent de la manière dont la vapeur est distribuée dans l'air. Cette explication, que nous avons proposée jadis, ne laisse pas que d'être plausible; mais il faut bien reconnaître qu'elle ne saurait s'appliquer à tous les cas. Nous en avons acquis la conviction en réfléchissant sur un phénomène dont l'observation

Fig. 125.



est due à M. Tacchini. Ce jeune astronome voyageait sur la Méditerranée, à bord d'un bateau à vapeur, et il observait le coucher du Soleil, le 8 août 1865. Il s'aperçut que le disque solaire était comme surmonté de deux aigrettes lumineuses, pareilles à deux boucles de cheveux renversées en sens opposés (*fig.* 125). Leur hauteur au-dessus du disque était tout au plus égale aux $\frac{7}{10}$ du disque lui-même. Enfin ces appendices suivaient assez bien le mouvement du Soleil, et ils s'enfoncèrent, comme lui, au-dessous de l'horizon.

M. Tacchini nous donna avis du phénomène dont il avait été témoin, et immédiatement nous compulsâmes le registre où sont inscrites les observations que nous faisons régulière-

ment sur les taches solaires. Nous trouvâmes que, ce même jour, il devait y avoir sur le bord du disque une tache accompagnée d'une grande facule, ayant à peu près la forme décrite par M. Tacchini (*fig.* 126); nous l'avions observée la veille à quelque distance du bord, et elle devait y être arrivée le 8 août au soir. Aussi n'avons-nous pas hésité à admettre que l'aigrette observée à ce moment pourrait bien être produite par une de ces masses lumineuses qui accompagnent les facules et deviennent visibles dans les éclipses.

De nouvelles observations sont venues confirmer cette idée.

Fig. 126.



M. Grosch, au Chili, pendant l'éclipse totale du 29 août 1867, a observé un faisceau de rayons recourbés, tout à fait semblable à celui qui a été dessiné par M. Tacchini ([1]). Tout dernièrement, un voyageur nous a assuré que, sur la fin du mois de février 1869, il a vu, à Pœstum, le Soleil se lever avec une aigrette analogue à celles qu'il présente dans les éclipses. Hâtons-nous de dire que ces explications ne reposent plus uniquement sur quelques faits isolés qu'on pourrait être

([1]) Voir *Bulletin météorologique du Collége Romain*, p. 87; 1867.

tenté de révoquer en doute. Nous savons maintenant qu'il se produit dans le Soleil de violentes éruptions : la matière qui le compose est lancée à des hauteurs considérables, avec des vitesses qu'on évalue à plus de 200 kilomètres par seconde. Si ces mouvements avaient lieu dans le vide absolu, les masses projetées avec une aussi grande vitesse parviendraient à des hauteurs incomparablement plus grandes que la longueur des aigrettes. La résistance de l'atmosphère qui entoure le Soleil doit ralentir bien vite ces mouvements ; mais elle doit cependant permettre à la matière lumineuse de s'élever assez haut pour que nous puissions expliquer ainsi la production des panaches. Nous verrons que, avec le spectroscope, on a pu observer des protubérances dont la hauteur atteignait sept et huit minutes ; et cependant les observations spectrales ne font voir que les parties les plus brillantes.

Les rayons obliques seraient produits par des faisceaux lumineux lancés dans leur direction. On a objecté qu'il est impossible d'admettre que la longueur réelle de ces faisceaux surpasse $\frac{1}{4}$ du rayon solaire. La raison serait que plusieurs comètes ont passé si près du Soleil, au moment de leur périhélie, qu'elles auraient dû rencontrer ces rayons ; que, s'ils avaient une aussi grande étendue, le mouvement de ces astres aurait dû éprouver, dans ce milieu nécessairement résistant, un ralentissement qui n'a jamais été constaté.

Il est assez facile de répondre à cette objection. Quelques comètes ont dû traverser non-seulement les rayons, mais la couronne elle-même. En passant ainsi à travers l'atmosphère solaire, elles ont pu se volatiliser en partie et s'échapper ensuite, à l'état de vapeur, comme font les bolides et les étoiles filantes dans l'atmosphère terrestre. Pour démontrer que les choses n'ont pu se passer ainsi, il faudrait connaître la partie de l'orbite qui précède le périhélie, et dans les cas dont il est

ici question il nous est impossible de la connaître d'une manière suffisante.

Parmi les comètes qui ont dû pénétrer dans la couche où se produit l'auréole, on doit citer avant tout la plus célèbre, celle de 1843, qui passa à une distance du Soleil égale à $\frac{1}{7}$ de son rayon. Elle a dû nécessairement produire une agitation considérable dans l'atmosphère solaire. Nous nous rappelons parfaitement la première observation que nous en fîmes à Lorette, le soir même où elle fut visible pour la première fois. Une circonstance très-extraordinaire accompagna l'apparition de cette comète; la lumière zodiacale était très-vive et légèrement teintée de rouge : aussi y eut-il quelque difficulté à distinguer ce qui appartenait à chacun de ces phénomènes; la comète semblait faire partie de la lumière zodiacale et s'en détacher comme une simple ramification. Les mêmes apparences furent constatées à Nice par un astronome très-distingué, M. Cooper. Si donc on observe dans certaines éclipses des rayons de forme extraordinaire, il est possible qu'ils soient produits par quelque explosion violente, ou bien par le passage de quelque corps étranger à travers l'atmosphère solaire.

Nous ne voulons pas dire cependant que notre atmosphère ne joue aucun rôle dans la production de ces apparences; son action est, au contraire, incontestable dans la plupart des cas, et elle suffit bien souvent pour tout expliquer.

§ V. — *Polarisation de la lumière de la couronne.*

La couronne est-elle lumineuse par elle-même, ou bien nous envoie-t-elle par réflexion une lumière d'origine étrangère? Cette question peut être résolue de deux manières : par

le spectroscope et par le polariscope. Nous verrons plus tard comment l'analyse spectrale peut nous guider dans cette étude, et nous serons alors conduits à regarder comme certain que la couronne est lumineuse par elle-même, et que la plus grande partie de la lumière qu'elle nous envoie provient de la radiation qui lui est propre. Mais n'y a-t-il pas aussi quelques rayons réfléchis mélangés avec ceux qui émanent de sa propre substance? Le polariscope peut seul répondre à cette question.

La lumière de la couronne fut étudiée à ce point de vue, en 1860 par M. Prazmowski, en 1868 par le capitaine Braunfield et par le capitaine Herschel; ils trouvèrent tous qu'elle était sensiblement polarisée. Nous-même, en 1860, nous trouvâmes des traces de polarisation; mais, comme les astronomes français et américains assuraient le contraire, la question ne pouvait être regardée comme résolue, ni dans un sens, ni dans l'autre. Elle fut reprise en 1870, et on croyait l'avoir définitivement tranchée, car tous les savants qui s'en étaient occupés avaient reconnu l'existence d'une certaine quantité de lumière polarisée : ce sont MM. Blaserna, Ranyard, Brett, Picquering, Langley, etc.; mais, à la suite des observations faites pendant l'éclipse de 1871, les avis furent de nouveau partagés. C'est donc une question à reprendre, ou plutôt il faut chercher quelles sont les causes qui amènent des différences aussi grandes dans l'étude du même phénomène. Entrons à ce sujet dans quelques détails.

Il paraît que toutes les divergences proviennent des instruments que l'on emploie et du mode d'observation. M. Prazmowski, observant avec un double quartz, trouva une polarisation radiale. MM. Blaserna et Ranyard employaient un polariscope à bandes de Savart, et comme, avec cet instrument, il est difficile, dans de semblables circonstances, de dé-

terminer le plan de polarisation, M. Blaserna, à Augusta, ne put que constater l'existence de la polarisation, sans pouvoir en déterminer le plan. D'après lui, la quantité de lumière polarisée serait très-considérable et à peu près égale à celle qu'on observe dans un ciel serein à 40 degrés du Soleil. L'état du ciel n'était pas favorable à ces observations, car il était un peu brumeux; grâce à cette circonstance, M. Blaserna a pu regarder ses résultats comme plus concluants qu'ils ne le sont en réalité : nous verrons qu'on peut élever des doutes à ce sujet. M. Ranyard, dans une station voisine d'Augusta, mais où le ciel était pur, trouva une polarisation considérable dans le plan radial du Soleil.

Nous ne devons cependant pas dissimuler une difficulté. M. Becker [1] et M. Picquering [2] nous assurent qu'ils ont vu les franges de Savart, non-seulement sur la couronne, mais jusque sur le disque de la Lune. M. Lockyer, en 1871, les a vues partout, toujours parallèles et dans la même direction, tandis que d'autres observateurs assurent n'avoir rien vu de semblable.

En présence de ces témoignages opposés, il ne nous appartient pas de prendre un parti et de trancher la question; mais on nous permettra quelques réflexions. On sait que l'air atmosphérique, lorsqu'il est chargé de vapeurs, produit des diffusions et des diffractions, d'où il résulte quelquefois des cercles irisés qui, pendant les éclipses, acquièrent un éclat extraordinaire. Les rayons lumineux pourraient bien aussi se polariser en traversant une couche épaisse d'air humide : de là une cause d'erreur dans les observations dont il est ici question. M. Tyndall a, en effet, démontré que certaines vapeurs dif-

---

[1] *Monthly Notices*, t. XXXI, p. 59.
[2] *Nature*, t. III, p. 59.

fusent et polarisent étrangement les rayons lumineux qui les traversent, et, de plus, il a constaté que, au coucher du Soleil, les rayons qui passent auprès des nuages peuvent être polarisés [1], ce qui permet d'élever des doutes sur la légitimité des conclusions de ceux qui ont constaté la polarisation.

Les phénomènes observés au Soleil couchant se produisant dans des conditions assez semblables à celles des éclipses, on devra y attacher de l'importance et les étudier sérieusement. Nous avons fait une observation toute récente à l'occasion des expériences que faisait M. Blaserna sur la lumière électrique. Il projetait le faisceau lumineux de la colline du Viminal sur Monte-Mario; lorsque les rayons passaient auprès de notre observatoire, sans cependant nous arriver directement de manière à nous faire voir le point lumineux, nous avons pu constater que la lumière qui éclairait l'air atmosphérique était fortement polarisée. La lumière qui rase le disque lunaire pendant les éclipses pourrait de même être polarisée par notre atmosphère qu'elle traverse ensuite.

Dans l'incertitude où nous mettent des témoignages contradictoires, nous nous contenterons de faire remarquer que les faits n'ont pas été bien constatés, qu'on n'a pas assez bien déterminé les circonstances dans lesquelles ils se produisent, et qu'on n'a pas les éléments nécessaires pour les expliquer et en tirer les conséquences. Ainsi il n'est pas prouvé que la polarisation observée pendant les éclipses soit due à une réflexion sur les molécules de l'atmosphère solaire; il n'est pas prouvé que la couronne nous envoie d'autre lumière que celle qui lui est propre.

---

(1) *Les Mondes*, t. XIX, p. 171.

Supposons, en effet, que l'air atmosphérique ou la vapeur d'eau ait le pouvoir de polariser la lumière par transmission, mais en petite quantité; ces quelques rayons seront comme noyés dans les torrents de lumière que le Soleil nous envoie en plein jour : on ne pourra pas en constater l'existence. Il n'en sera pas de même pendant les éclipses, lorsque la lumière du Soleil cesse d'arriver jusqu'à nous. Les faisceaux de rayons à peu près parallèles qui rasent les bords de la Lune produisent sur nos yeux, comme nous l'avons déjà expliqué, l'effet de rayons divergeant en forme de panaches. Ces rayons, par l'action des molécules de gaz qu'ils rencontrent en les rasant, pourront se polariser d'une manière d'autant plus sensible que l'air est plus chargé de vapeurs.

Ce n'est pas une théorie que nous prétendons exposer ; nous hasardons une hypothèse, et nous invitons les physiciens à étudier, avant la prochaine éclipse, cette question importante et curieuse; en attendant le résultat de leurs travaux, nous ne pouvons que suspendre notre jugement.

§ VI. — *Considérations générales sur la couronne.*

Pour terminer l'étude de la couronne, nous devrions parler de l'analyse spectrale de sa lumière; mais nous nous réservons de traiter spécialement ce sujet dans l'un des Chapitres suivants. Bornons-nous à résumer ici les conclusions qui résultent de tout ce que nous venons de dire.

1° Les dessins que nous avons reproduits montrent d'une manière évidente que l'étendue de la couronne est loin d'être uniforme. Nous l'affirmons sur la foi des épreuves photographiques. Il est bien vrai que la forme de l'image ainsi obtenue dépend uniquement des radiations actiniques; il est cepen-

dant impossible d'admettre qu'il puisse exister des inégalités semblables dans l'activité chimique, s'il n'y avait pas des inégalités de même nature dans les radiations lumineuses. L'image photographique peut donc nous donner une idée exacte de la forme réelle de la couronne.

2° On peut se demander s'il n'y a point quelque relation entre ces apparences et quelque phénomène solaire déjà connu. Au premier coup d'œil, on voit que la plus grande élévation de la couronne correspond à la région des taches et des facules; on sait, en effet, que le maximum des taches se produit, non pas à l'équateur, mais dans les latitudes qui environnent le trentième parallèle. Il faut cependant remarquer que la région la plus élevée de l'auréole dépasse considérablement la zone des taches, puisqu'elle s'étend jusqu'à 30 degrés des pôles et quelquefois plus loin. Nous avons cherché à nous expliquer cette différence, et nous avons reconnu qu'elle tient à la loi de distribution des protubérances et des facules. On admet que les facules accompagnent généralement les taches; et cependant, en étudiant attentivement la surface du Soleil, dont nous projetions l'image dans une chambre parfaitement obscure, nous avons constaté que les facules, ou granulations brillantes, s'étendent bien au delà des limites des taches. Très-souvent, et surtout dans les périodes de grande activité, elles forment autour des pôles des zones bien tranchées et parfaitement visibles. Il semble que la partie la plus élevée de la couronne s'étend jusque-là, et nous le reconnaîtrons plus clairement encore lorsque nous aurons étudié les protubérances.

Une longue série d'observations nous a prouvé que cette distance aux pôles est très-variable; à l'époque de la dernière éclipse (12 décembre 1871), elle était si faible qu'on voyait des protubérances jusque sur les pôles, où d'ordinaire il n'y

en a pas. Nous verrons, dans les éclipses prochaines, si cette explication est fondée.

3° Quant aux rayons curvilignes de l'auréole qui ont été observés directement, et dont les observations photographiques ne nous permettent plus de révoquer l'existence en doute, ils prouvent que les parties supérieures de l'atmosphère solaire ne sont pas occupées par des masses en repos, mais qu'il y a dans ces régions des mouvements extrêmement rapides. Cette conclusion, qui s'impose à tous ceux qui examinent sans prévention les photographies de lord Lindsay, avait vivement frappé M. Janssen pendant ses observations, et il l'a hautement proclamé à son retour des Indes.

Cette couche atmosphérique doit d'abord être animée d'une circulation calme et régulière, analogue, sauf la rapidité, à celle qui existe dans l'atmosphère des planètes; mais, en outre, il doit y avoir des mouvements violents et irréguliers, de véritables explosions, soudaines et gigantesques, provenant de masses considérables qui sont lancées de bas en haut par les couches les plus basses. Au milieu de la circulation générale, il doit se produire des actions particulières et locales dont l'influence est d'autant plus grande qu'il s'agit de masses énormes portées à une température très-élevée. Il y a là toute une série de problèmes qui se posent naturellement à nous et dont la solution nous conduira sans doute à des conséquences inattendues. Qu'il nous suffise pour le moment d'apprendre par cet exemple combien il faut être réservé lorsqu'il s'agit de rejeter des faits constatés par des hommes éminents, pour cette seule raison que nous ne pouvons les expliquer.

On trouve une différence assez grande entre les figures qui représentent les différentes éclipses. Nous ne devons pas en être surpris, et il ne faut pas se hâter de l'attribuer aux défauts des observations. Ces différences peuvent exister réelle-

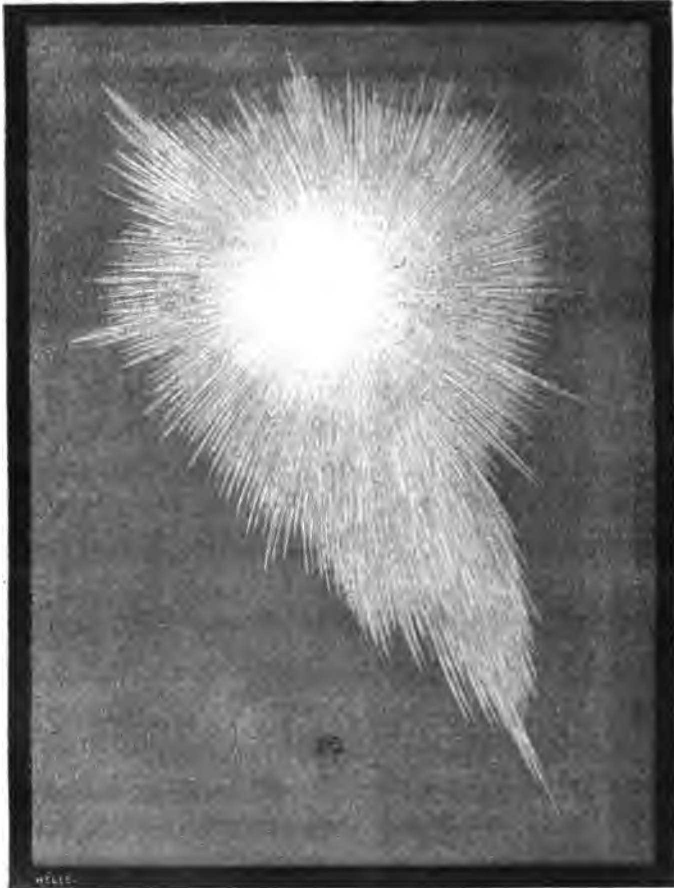
ment, aussi bien que les variations des taches et des protubérances. La dernière éclipse s'est produite à une époque de grande activité solaire : c'est pour cela peut-être que la couronne présenta alors un plus grand éclat. Si une éclipse se produisait à une époque de calme, les apparences seraient tout à fait différentes.

4° On ne connaît pas encore avec certitude l'étendue de la couronne, ou du moins de l'atmosphère qui en est le siége. Nous ne connaissons que la limite qui est déterminée par le pouvoir optique de nos instruments, par la sensibilité physiologique de nos organes et par l'impressionnabilité de nos préparations chimiques. Pour les régions qui dépassent ces limites, nous ne savons rien. Il peut exister là une matière plus raréfiée n'exerçant aucune action appréciable sur nos sens. On a supposé, et ce n'est pas sans raison, que cette atmosphère s'étend à une distance très-considérable, et que c'est elle peut-être qui produit la lumière zodiacale, comme l'avait déjà soupçonné Olbers; mais, sans aller aussi loin, nous pouvons bien penser qu'elle arrive jusqu'à l'extrémité des aigrettes, et nous verrons qu'il n'y a rien d'impossible dans cette hypothèse.

5° Tout le monde admet à présent que la couronne appartient au Soleil; mais on peut se demander si l'on ne pourrait pas arriver à la voir en tout temps par un procédé quelconque, par exemple par des éclipses artificielles. Nous savons que, dans des circonstances particulières, M. Tacchini en a vu quelque chose auprès de l'horizon; dernièrement encore il a pu la voir complétement en plein jour. Voici ce qu'il nous écrivait le 28 mai 1871 : « Au zénith, le ciel était d'un bleu très-foncé; je n'ai jamais rien vu de pareil. A 9 heures, je regardais vers le Soleil en cachant son disque, et j'ai observé une auréole dont voici la forme (*fig.* 127). Après avoir fait

cette observation, je priai M. Delisa d'en faire une semblable, sans rien lui dire de ce que j'avais vu. Au bout de quelques

Fig. 127.

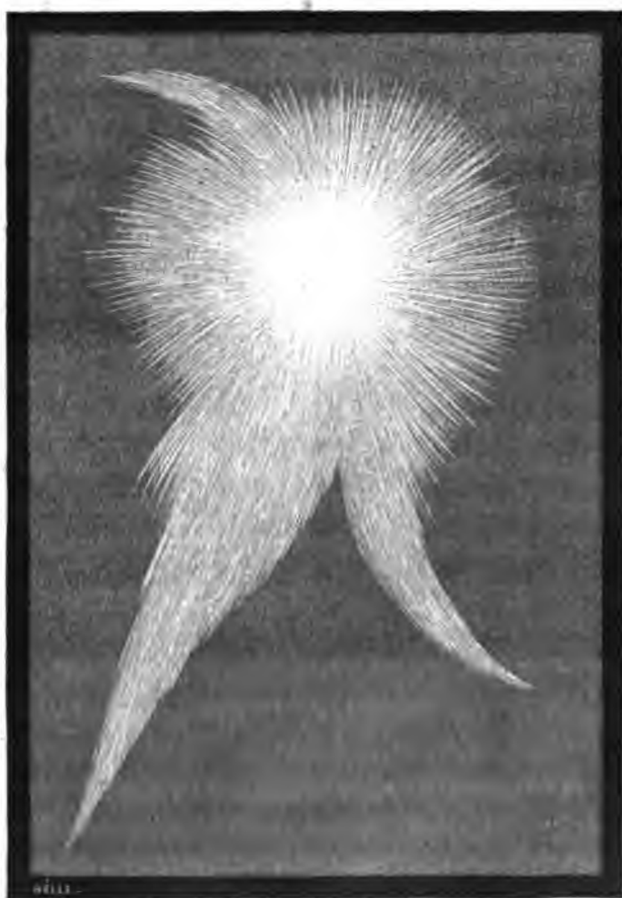


heures, il avait terminé son dessin; en voici la forme (*fig.* 128).

» Le changement de direction que nous remarquons dans le plus grand panache tient sans doute au mouvement que la sphère céleste avait exécuté dans l'intervalle des deux obser-

vations. Le soir le Soleil parut à l'horizon avec une traînée bien sensible, de forme triangulaire, ayant une couleur jaune-

Fig. 128.



orange. Cette traînée était dans la direction de Jupiter et de Vénus. »

En terminant sa lettre, M. Tacchini reconnaît l'importance du projet que nous avions proposé, de faire des observations

semblables sur l'Etna, où l'atmosphère présente une teinte si foncée. Les essais que nous avons faits à Augusta à l'époque de l'éclipse nous montrent qu'il y aurait là pour la science un intérêt de premier ordre. Le ciel de la Sicile est d'une pureté admirable; celui de Rome paraît en comparaison sale et brumeux.

Signalons encore une idée qui n'est pas sans importance. La science moderne a constaté qu'il existe des amas de matière cosmique, analogues aux nébuleuses, circulant comme des comètes dans l'intérieur du système solaire, et qui, au moment du périhélie, se trouvent très-voisins du Soleil. Ce fait n'est peut-être pas étranger à certaines apparences extraordinaires qui se présentent pendant les éclipses. Ne serait-ce point à quelqu'une de ces masses cosmiques, fortement éclairée par la lumière solaire, qu'il faudrait attribuer les rayons et les arcs recourbés dont nous avons déjà parlé plusieurs fois? Le temps pourra seul faire connaître la valeur de ces idées, qui ne sont en ce moment que de simples conjectures.

La couronne a donc son siége dans le Soleil et non dans la Lune, mais c'est un phénomène très-complexe. Elle est certainement lumineuse par elle-même, mais on n'a pas encore prouvé qu'elle est incapable de réfléchir la lumière solaire. Les limites apparentes dépendent principalement de l'activité du Soleil, mais elles subissent aussi l'influence de notre atmosphère. Ses limites véritables nous sont inconnues, et elle s'étend probablement jusqu'à la lumière zodiacale.

CHAPITRE III.

DES PROTUBÉRANCES OU PROÉMINENCES ROSES QU'ON OBSERVE PENDANT LES ÉCLIPSES TOTALES DE SOLEIL.

AVANT-PROPOS.

Le phénomène des protubérances est maintenant connu de tout le monde : aussi pourrait-on penser qu'il est inutile de retracer l'histoire de leur découverte. Nous avions, en effet, l'intention d'omettre cet article; mais, outre l'importance réelle du sujet, nous trouvons là un exemple frappant du procédé analytique employé par la science contemporaine. Nous verrons avec quelle patience et quelle persévérance elle a su étudier les plus minces détails, et arriver à des découvertes admirables à l'aide de phénomènes qui paraissaient insignifiants au premier abord. C'est ainsi qu'on voit toujours avec plaisir les sources d'un grand fleuve.

§ I. — *Premières observations des protubérances.*

Ce fut pendant l'éclipse du 8 juillet 1842 que l'attention des astronomes fut attirée par ces protubérances, qui s'élancent autour de la Lune comme des flammes gigantesques, de couleur rose ou fleur de pêcher. La surprise que leur causa ce phénomène inattendu ne leur permit pas de faire des observations précises, de sorte qu'il y eut un désaccord com-

plet entre les différentes relations. Baily remarqua trois proéminences très-vastes, presque uniformément réparties du même côté (*fig.* 106, p. 310). Airy en observa trois en forme de dents de scie, mais placées au sommet (*fig.* 129). Arago en

Fig. 129.



vit deux à la partie inférieure du disque (*fig.* 130). Struve et

Fig. 130.



Schidlofscky remarquèrent les mêmes qu'Arago, et de plus ils notèrent une bande rose embrassant un arc de 45 degrés environ. A Vérone, ces flammes demeurèrent visibles quelque temps après l'apparition du Soleil.

Ces appendices avaient des dimensions considérables. L'astronome français Petit mesura la hauteur de l'un d'entre

eux et la trouva égale à 1′45″, ce qui équivaut presque à 6 diamètres terrestres, c'est-à-dire à 80 000 kilomètres. Les appréciations des autres observateurs variaient entre 1 minute et 2 secondes.

La discussion s'ouvrit aussitôt sur la nature de ces protubérances. On les prit d'abord pour des montagnes; mais cette opinion était inconciliable avec les observations d'Arago, quelques-unes de ces prétendues montagnes étant très-inclinées, surplombant même assez fortement pour que l'équilibre fût impossible. La plupart des savants les regardèrent comme des flammes ou comme des nuages. Quelques-uns, se fondant sur le peu d'accord qui régnait entre les observateurs, déclarèrent que c'étaient de pures illusions d'optique, des effets de mirage produits à la surface de la Lune : telle était l'opinion de Faye, de Marquez, de Feilitzsch. Il était donc indispensable de faire des observations ultérieures, de surveiller avec soin les éclipses suivantes et de recourir aux observations passées.

En réalité, ces phénomènes n'étaient pas nouveaux; mais, comme il arrive souvent pour les choses extraordinaires dont nous n'avons aucune idée, on n'avait rien compris aux récits d'ailleurs inexacts et exagérés des observateurs. Ils avaient parlé d'échancrures vues dans le disque lunaire, de flammes, d'éclairs, de nuages et d'orages vus dans l'atmosphère de la Lune. Cette apparence d'échancrure notée par quelques observateurs est due à un phénomène d'irradiation; elle se produit facilement lorsqu'on observe à l'œil nu ou avec un faible grossissement, comme on l'a encore remarqué dans l'éclipse de 1868 (Hennessy, Ray).

De toutes les observations anciennes, la plus détaillée est celle que Wassénius fit à Gothenbourg, le 2 mai 1733. Dans la couronne qu'il attribue à l'atmosphère de la Lune, il crut

voir flotter plusieurs nuages rouges ; l'un d'eux paraissait plus grand que les autres, et semblait composé de trois masses superposées, *complétement séparées du disque lunaire*. (*Philos. Transact.*, t. XXXVIII, p. 135 ; et *Astr. Nachr.*, n° 463.) La *fig.* 131 montre bien que ce sont des nuages, mais il reste

Fig. 131.



à savoir s'ils appartiennent réellement à la Lune ou s'ils ne dépendent pas du Soleil.

Fig. 132.



On attendait avec impatience l'éclipse de 1851 qui devait être totale en Suède. M. Airy organisa une expédition et prépara des instruments destinés à prendre des mesures précises. Au moment de la totalité, il observa d'abord une protubérance *a* (*fig.* 132) ayant la forme d'une équerre terminée en pointe ; au-dessous se trouvait un petit cône, et plus loin, au point *d*, un petit nuage suspendu. Un peu plus tard il distingua une pointe *c* ; puis au bout d'une minute la protu-

bérance *b* située à l'autre extrémité du diamètre; enfin parut en dernier lieu un arc rosé *e*. Les autres observateurs remarquèrent les mêmes phénomènes avec de légères différences de formes. La figure donnée par M. Carrington est presque identique; on y remarque seulement un léger nuage blanchâtre joignant la protubérance principale avec le nuage isolé *d*. Cependant la protubérance *a* n'a pas tout à fait la même forme dans les dessins exécutés par des observateurs très-éloignés les uns des autres. M. Hind a donné le dessin suivant (*fig.* 133). M. Dawes a donné une forme intermé-

Fig. 133.



diaire entre les deux, et de plus l'arc *e* (*fig.* 132) lui parut beaucoup plus étendu. M. Talbot, placé presque à la limite de la zone de totalité, vit ce même arc rose embrasser une étendue à peu près égale à une demi-circonférence.

Ces observations nous permettent de formuler avec certitude les conclusions suivantes : 1° Les protubérances ne sont pas des montagnes; cette hypothèse est inconciliable avec leurs formes; 2° on doit les regarder comme des masses gazeuses, dont la forme est assez analogue à celle de nos nuages; leurs courbures rappellent assez bien la fumée qui s'échappe de nos volcans; 3° la variété des formes attribuées à une même protubérance peut tenir à des variations réelles;

mais elle peut résulter aussi du peu d'exactitude des dessins; 4° il y a une relation évidente entre ces protubérances et les arcs roses déjà observés en 1842, mais qu'on observa beaucoup mieux cette fois : on peut légitimement supposer que ces arcs forment la partie visible d'une couche continue qui enveloppe complétement le Soleil; 5° on voyait la grandeur des protubérances s'accroître du côté que quittait la Lune et diminuer du côté où elle s'avançait : donc c'est sur le Soleil que se trouve le siége du phénomène; 6° tous les observateurs n'ont pas vu le même nombre de protubérances; ils ne leur ont pas assigné exactement la même place. Cela tient à la rapidité du phénomène, dont la totalité dure si peu de temps, qu'il n'est pas possible d'examiner le contour du disque avec l'attention qu'on y apporterait dans d'autres circonstances.

Ces résultats ne parurent pas assez sûrs à un certain nombre d'astronomes. Les mesures semblaient peu exactes, les descriptions peu concordantes; aussi continua-t-on à regarder ces phénomènes comme des illusions d'optique et des effets d'interférence et de mirage. Pour convaincre tout le monde, il fallait des témoignages irrécusables, des mesures d'une exactitude toute mécanique; la Photographie pouvait seule répondre à ces exigences, et c'est pour cela qu'on y attacha tant d'importance en 1860.

A part ces doutes peu fondés, il restait encore à résoudre plusieurs questions importantes : 1° quelle est l'intensité lumineuse des protubérances? 2° quelle est leur couleur précise? 3° ont-elles quelque relation avec les taches et les facules? Pour répondre à ces questions, il faut avoir recours à des mesures très-exactes, mesures que la Photographie peut seule exécuter en aussi peu de temps. Cependant, comme la Photographie, surtout dans des circonstances aussi excep-

tionnelles, est un moyen de recherches capricieux et peu sûr, on eut soin de contrôler ses indications à l'aide d'instruments spéciaux permettant d'obtenir directement et rapidement des mesures suffisamment précises. Pour cela, les astronomes ont proposé différents moyens qu'il ne sera pas inutile de rappeler ici. Ces procédés ne manquent pas de valeur ; ils n'ont rien perdu de leur importance, et ils pourront toujours servir dans les circonstances où il serait difficile d'employer des méthodes plus parfaites.

Pour mesurer les dimensions des protubérances, on proposa de diviser le champ de la lunette en petits carrés par des fils assez gros et tendus suivant deux directions rectangulaires, à des distances mesurées d'avance. Ce procédé présentait de grands avantages, mais il avait l'inconvénient d'encombrer le champ de la vision. Nous avons réussi en employant un moyen un peu différent. Le champ de notre lunette fut muni de deux fils de platine médiocrement fins, faisant entre eux un angle assez aigu pour qu'on pût évaluer les dimensions des protubérances sans faire usage de vis micrométrique. Pour prendre les angles de position, nous mîmes à l'oculaire une alidade portant une pointe, et mobile devant un cercle de carton ; la pointe, pressée au moment convenable, laissait sur le carton une trace qu'on pouvait ensuite étudier à loisir pour en déduire l'angle de position.

Le succès fut complet, comme nous le verrons bientôt, et nous recommandons aux observateurs ces moyens sûrs et expéditifs. Seulement, la Photographie ne nous apprenant rien sur les couleurs, il fallut y suppléer par des observations directes ; mais tous les observateurs n'éprouvent pas, en présence du même objet, des impressions identiques : leurs yeux ne sont donc pas des instruments comparables. Cependant ils s'accordaient tous à dire que les protubérances étaient d'un

rouge plus ou moins clair, mélangé d'un violet analogue à celui de la fleur de pêcher. On remarqua cependant que la protubérance recourbée de 1851 était blanche à sa base, et cette remarque s'applique également aux protubérances de 1860; le rose était la couleur dominante, mais sur les bords on voyait des nuages jaunes parfaitement marqués, la base étant blanche. M. de la Rue fit la même observation. Cet astronome avait préparé des étoffes de différentes couleurs, qui devaient servir de terme de comparaison; mais cette méthode ne put donner aucun résultat, faute de lumière pour éclairer les étoffes. On pourrait employer des flammes colorées ou, mieux encore, des tubes de Geissler éclairés par un courant électrique; mais l'analyse spectrale a fait abandonner tous ces projets. On n'a cependant pas dit le dernier mot sur cette question. Dans l'éclipse que nous avons observée en Sicile, nous avons vu une magnifique protubérance couronnée par un beau sommet jaune, et notre observation a été confirmée par le P. Denza : il faudra voir si c'est un fait isolé ou s'il s'en reproduit de semblables dans les éclipses prochaines, et la Photographie ne peut rien nous apprendre à cet égard. Dans d'autres circonstances, on a trouvé sur les épreuves photographiques des protubérances que personne n'avait observées directement, d'où il faudrait conclure qu'il y en a qui n'émettent que des rayons chimiques. De plus, il y aurait lieu de comparer les résultats de l'observation directe avec ceux de l'observation spectrale. Aussi, quels que soient les progrès de la science et la perfection de nos procédés, malgré l'emploi si précieux des méthodes photographiques, il ne sera pas inutile, dans les prochaines éclipses, de faire aussi de bonnes observations optiques des protubérances.

§ II. — *Photographies obtenues en Espagne pendant l'éclipse de* 1860.

Afin de mettre le lecteur au courant des moyens employés par les astronomes pour photographier les éclipses, nous exposerons en détail les préparatifs qui furent faits en 1860 et les résultats qu'on obtint alors. Quelques essais avaient déjà été faits précédemment; mais cette tentative est la première qui ait été couronnée d'un succès véritable. Pour les expéditions suivantes, nous nous bornerons à enregistrer les résultats. Nous avons déjà dit que deux expéditions furent organisées pour observer photographiquement l'éclipse de 1860 : la première par M. de la Rue, la seconde par nous, avec la collaboration de M. Aguilar, directeur de l'Observatoire de Madrid, et de M. le professeur Monserrat, de Valence. M. de la Rue choisit Rivabellosa, près de l'Atlantique, tandis que nous avions pris position au *Desierto de las Palmas*, auprès de la Méditerranée.

Nous avions tous les deux une grave difficulté à vaincre, car nous ignorions complétement le pouvoir photogénique que possède la lumière pendant les éclipses; nous ne savions donc pas s'il nous serait possible d'obtenir des épreuves en opérant avec la rapidité qu'exigeaient les circonstances. M. de la Rue avait adopté l'héliographe de Kew, et, comme les images formées directement au foyer de l'objectif étaient très-petites, il préféra les agrandir avec l'oculaire. Nous préférâmes, au contraire, prendre l'image directe donnée par l'objectif de Cauchoix. Cette image, ayant 25 millimètres de diamètre, donnait déjà des résultats parfaitement visibles, et d'ailleurs il nous restait toujours la ressource de l'agrandir par l'un des procédés connus. Deux raisons nous portèrent à préférer cette

méthode : 1° la faible intensité de la lumière, qui, en la supposant égale à celle de la pleine Lune, semblait devoir exiger une minute d'exposition si nous agrandissions l'image : en opérant sur l'image directe, nous trouvions plus de sûreté ; 2° cette méthode nous permettait de faire un plus grand nombre d'épreuves dans le même temps, et, par conséquent, de fixer un plus grand nombre de phases.

Le résultat a prouvé que les deux systèmes sont excellents et que chacun d'eux a ses avantages. On distingue plus de détails dans les images agrandies; mais l'image directe fixe une plus grande étendue de la couronne.

Notre première plaque ne fut exposée que pendant six secondes, et cependant, outre les protubérances, elle montre une trace parfaitement sensible de la couronne. La deuxième fut exposée pendant vingt secondes environ; mais trois secousses imprimées à l'équatorial pendant ce temps ont produit autant d'images distinctes et séparées des protubérances : il faut en conclure qu'avec un objectif de 6 pouces, comme le nôtre, un temps très-court suffit pour la reproduction de ces appendices. Le choix de la méthode dépend donc du but qu'on se propose; mais, avec les moyens si délicats dont on dispose aujourd'hui, on peut abréger la durée de l'exposition, et il n'est pas nécessaire d'employer de très-grandes lunettes. Lord Lindsay a obtenu des résultats merveilleux en agrandissant des images qui n'avaient que 8 ou 10 millimètres de diamètre. Pour les protubérances, si l'on veut les photographier avec l'objectif seulement, elles seront toujours *brûlées*, à moins que l'exposition ne dure qu'un instant; aussi vaut-il mieux les agrandir avec l'oculaire. Si l'on n'emploie que l'objectif, avec une exposition absolument instantanée, on pourra parfaitement distinguer les détails des protubérances.

Un an après l'éclipse, nous avons, avec M. de la Rue lui-

même, agrandi nos petites photographies, de manière à obtenir des épreuves ayant les mêmes dimensions que les siennes, et nous avons trouvé une identité parfaite dans les détails les plus délicats. La seule différence consistait en ce qu'à Rivabellosa les protubérances supérieures étaient plus hautes, tandis qu'elles étaient un peu plus petites au *Desierto;* le contraire avait lieu pour les protubérances de la partie inférieure. Ce phénomène était dû à une petite différence de parallaxe, les observateurs étant, l'un un peu au nord, l'autre un peu au sud de la ligne centrale de la totalité (*voir* les *Mémoires de l'Observatoire du Collége Romain,* 1863).

Il suffira donc de décrire nos photographies et de les comparer avec celles du savant anglais. Nous reproduirons ici les trois plus importantes, la première, celle du milieu et la dernière.

La *fig.* 134 représente la première épreuve prise immédiatement après le commencement de la totalité. Elle contient sept protubérances principales :

A. Protubérance ayant deux sommets très-rapprochés et peu élevés. Dans les photographies de M. de la Rue, elle est à peine visible, on n'aperçoit que les deux sommets; cela tient, comme nous l'avons dit plus haut, à un effet de parallaxe.

C. Grande protubérance en forme de nuage, inclinée de 45 degrés, arrondie à sa base, pointue au sommet, possédant une structure hélicoïdale, comme le montre la figure agrandie de M. de la Rue.

E. Petits nuages très-déliés dont l'ensemble forme une corne recourbée, ayant une hauteur d'environ 2′40″. Cette protubérance, retrouvée à la loupe dans nos petites photographies, décida M. de la Rue à les agrandir pour les comparer aux siennes. Cette circonstance prouve la précision de nos clichés. Malheureusement, de Madrid on fit circuler, immé-

diatement après l'éclipse, des épreuves sur papier assez défectueuses, ce qui nuisit beaucoup à nos photographies, dans l'esprit même des savants, jusqu'au moment où la reproduction, faite sous les yeux de M. de la Rue lui-même, vint justifier ce que nous avions avancé sur l'identité de nos résultats comparés aux siens.

Fig. 134.



H. Amas compliqué de petits nuages dont la partie inférieure forme une espèce de croix.

G. Amas énorme de matière brillante qui a solarisé les épreuves, de sorte que les détails intérieurs ont disparu. Sa forme arrondie prouve qu'elle n'était pas en contact immédiat avec le Soleil, mais suspendue dans son atmosphère. Vue dans la lunette, elle offrait parfaitement l'aspect d'une chaîne de montagnes, par les dentelures et les pointes jaunâtres qui la terminaient à son sommet. On peut remarquer que cette pro-

tubérance semble pénétrer dans le disque de la Lune et y former une entaille. Cette apparence est due au mouvement même de la Lune pendant la durée de l'exposition de la plaque. La Lune, avançant dans la direction où se trouve la protubérance, ne pouvait détruire l'impression déjà produite par la partie brillante, tandis que sa présence empêchait l'action de la couronne qui n'est pas aussi rapide. Dans les photographies agrandies, on voit que les bords de la protubérance sont parfaitement tranchés, tandis que celui de la Lune reste indécis. Cette circonstance explique aussi un phénomène curieux qu'on a remarqué dans les photographies de M. de la Rue : les plaques ayant été exposées une minute, le mouvement de la Lune s'est fait sentir plus fortement ; aussi son bord paraît-il double, et c'est à l'intérieur de son disque qu'on voit l'arc rosé dont nous avons parlé

I. Flamme gigantesque, ou plutôt énorme cumulus, dans lequel on distinguait des nuances de jaune et de rouge. M. de la Rue la comparait à un arbre abattu.

K. Proéminence à deux sommets, dont l'un, plus délié et moins vif, se prolonge en forme de corne. Cette protubérance est plus petite dans nos photographies que dans celles de M. de la Rue, pour une cause analogue à celle qui a produit l'effet contraire au point A.

Dans toute la partie gauche, on ne voit encore aucune protubérance.

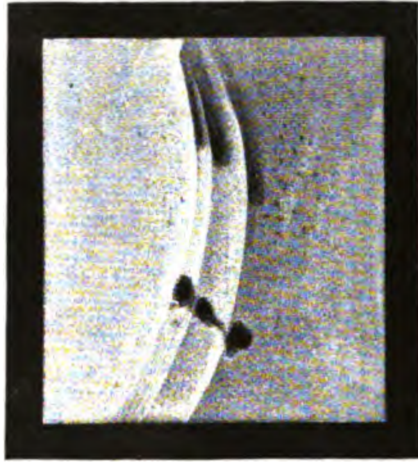
La ligne noire XY représente un fil tendu dans la lunette et dirigé suivant le parallèle céleste, afin de relever la position des protubérances par rapport à l'équateur solaire.

La deuxième photographie (*fig.* 135) avait d'abord été rejetée comme inutile, ainsi que nous l'avons dit ci-dessus, car, à cause d'un choc donné à la lunette, il s'était produit des impressions multiples, mais en réalité elle est, par cela même,

très-précieuse : elle prouve d'une manière évidente la puissance actinique de ces flammes, car quelques-unes de ces impressions ont été produites en moins de trois secondes ([1]).

La troisième photographie (*fig.* 136) a demandé trente secondes d'exposition. Les protubérances commencent à montrer leurs sommets du côté gauche, et elles deviendront de plus en plus distinctes. Ce qu'il y a de plus remarquable dans

Fig. 135.



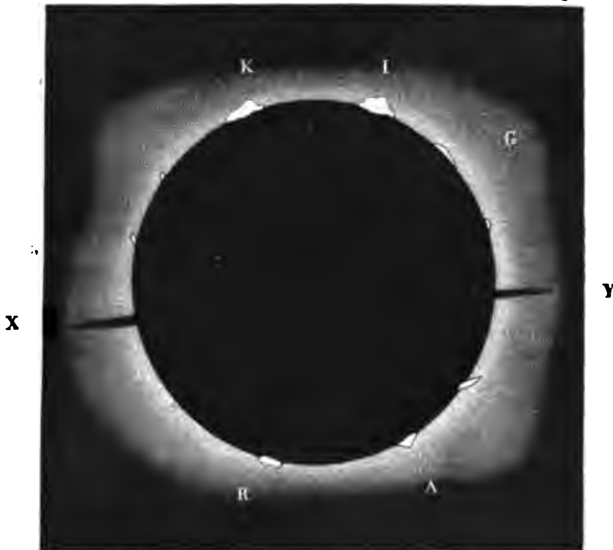
cette figure, c'est la couronne. Elle est très-irrégulière, mais on peut remarquer qu'elle présente une étendue plus considérable à droite et à gauche que dans les autres directions, c'est-à-dire qu'elle est plus développée dans le plan de l'équateur que suivant la ligne des pôles, et plus encore à la latitude de 40 à 50 degrés. Nous avons déjà relevé ces détails en parlant de la couronne; mais nous devons ajouter ici que

([1]) La *fig.* 135 représente les protubérances en noir, comme elles sont dans les clichés, tandis que toutes les autres figures les représentent en blanc, comme on le voit dans les épreuves positives.

la gravure est incapable, malgré le talent merveilleux des artistes, de reproduire toutes les nuances qu'on observe dans les originaux.

La dernière de nos photographies est représentée dans la *fig.* 137. A la suite du point K, on rencontre une petite proéminence, et, entre les deux, une autre encore plus petite.

Fig. 136.



Elles ne sont pas visibles dans les épreuves de M. de la Rue, à cause de la différence de parallaxe que nous avons déjà signalée.

L est une protubérance très-élevée dont le sommet est nettement tracé dans toutes les photographies.

En Q est un arc rosé très-étendu; il est solarisé dans notre épreuve, et il n'a pas été mieux réussi dans celle de M. de la Rue. Heureusement que nous pouvons, par des ob-

servations directes, rétablir les détails qui sont effacés. Un instant après le milieu de la totalité, je regardai la région où le Soleil allait sortir du cône d'ombre; je vis paraître une série de flammes vivement colorées en jaune et en rouge, et surtout je remarquai un nuage allongé de couleur rose, parfaitement suspendu dans l'intérieur de la couronne. J'en don-

Fig. 137.



nai immédiatement avis à mes collègues, afin qu'ils pussent contrôler mon observation, et je fis aussitôt le dessin qui est reproduit dans la *fig.* 138.

Cette forme était pour moi du plus grand intérêt, car je la regardais alors comme décisive au point de vue de la théorie; elle confirmait, d'une manière éclatante, des idées que nous pouvons maintenant appuyer sur des bases encore plus solides.

Il est regrettable que, dans cette phase, les deux séries de photographies se soient trouvées imparfaites; mais enfin nous

possédons les documents nécessaires pour constater ce que nous désirions connaître. Là encore nous remarquons que les protubérances empiètent sur le disque de la Lune, comme nous l'avons déjà fait observer. Nous retrouvons aussi la protubérance R, la dernière que nous ayons signalée dans le dessin de la *fig.* 138.

Afin de pouvoir comparer nos photographies avec celles de M. de la Rue, nous les avons agrandies de manière à obtenir une figure de même dimension que les siennes; puis, après avoir huilé une épreuve pour la rendre transparente, nous les avons superposées et nous avons pu constater une identité

Fig. 138.



parfaite, sauf les détails indiqués ci-dessus; aussi croyons-nous inutile de reproduire les dessins de M. de la Rue.

De ces importantes observations on peut évidemment tirer les conclusions suivantes :

1° Les protubérances ne sont pas de simples apparences produites par des illusions d'optique : ce sont des phénomènes réels ayant leur siége dans le Soleil. Nos observations ayant été faites à deux points distants l'un de l'autre d'une centaine de lieues, il est impossible de supposer que des figures aussi nettes et aussi identiques soient produites par un phénomène de mirage ou par quelque autre cause semblable.

2° Les protubérances sont des amas de matière lumineuse ayant une grande vivacité et possédant une activité photogénique très-remarquable. Cette activité est si grande, que plusieurs des protubérances que nous voyons sur nos épreuves,

et précisément la protubérance E (*fig.* 134), n'ont pu être observées directement, même avec de bons instruments : c'est peut-être parce qu'elles n'émettaient que des rayons chimiques et peu ou point de rayons lumineux.

3° Il y a des amas de matières protubérantielles suspendus et isolés comme des nuages dans l'atmosphère. Si leur forme est variable, les variations se sont produites assez lentement pour qu'il ait été impossible de les constater durant un intervalle de dix minutes.

4° Outre les protubérances, il existe une couche de la même matière, et qui enveloppe le Soleil de toutes parts. Les protubérances proviennent de cette couche : ce sont des masses qui se soulèvent au-dessus de la surface générale et s'en détachent même quelquefois ([1]). Quelques-unes d'entre elles ressemblent aux fumées qui sortent de nos cheminées ou des cratères des volcans, et qui, arrivées à une certaine hauteur, obéissent à un courant d'air en s'inclinant horizontalement.

5° Cette conclusion ressort évidemment de la protubérance C ; elle avait déjà été mise en évidence par les nombreuses protubérances observées en 1851 et surtout en 1855.

6° Le nombre des protubérances était incalculable. Dans l'observation directe, le Soleil nous parut tout environné de flammes ; elles étaient tellement multipliées, qu'il nous paraissait impossible de les compter. L'observation photographique a pleinement justifié cette première impression ([2]).

7° La hauteur des protubérances est très-considérable,

([1]) Cette conclusion fut alors regardée comme une hypothèse hasardée ; c'est maintenant une vérité qu'on vérifie tous les jours.

([2]) Nous savons maintenant que le nombre des protubérances est très-variable avec le temps. En 1860, le Soleil était dans une époque de grande activité.

surtout si l'on remarque que, pour l'évaluer, il faut tenir compte de la partie éclipsée par la Lune. Ainsi la protubérance E n'a pas moins de 3 minutes de hauteur, ce qui correspond à 10 fois le diamètre de la Terre; les autres ont pour la plupart de 1 à 2 minutes d'élévation.

§ III. — *Observations postérieures des protubérances. — Leurs relations avec la couronne.*

Les phénomènes observés en 1860 ont été confirmés par toutes les observations postérieures. La *fig.* 139 est tirée des photographies du major Tennant, photographies exécutées à Guntoor, dans les Indes, pendant l'éclipse de 1868, et reproduites à Londres par M. de la Rue. On y voit la route suivie par la Lune, ainsi que son contour au commencement et à la fin de la totalité. On y voit également la position de l'équateur solaire et celle des pôles (1). Dans la gravure anglaise on avait exagéré la grandeur des taches. Nous leur avons restitué leur position et leur grandeur véritables, d'après les observations faites le même jour au Collége Romain.

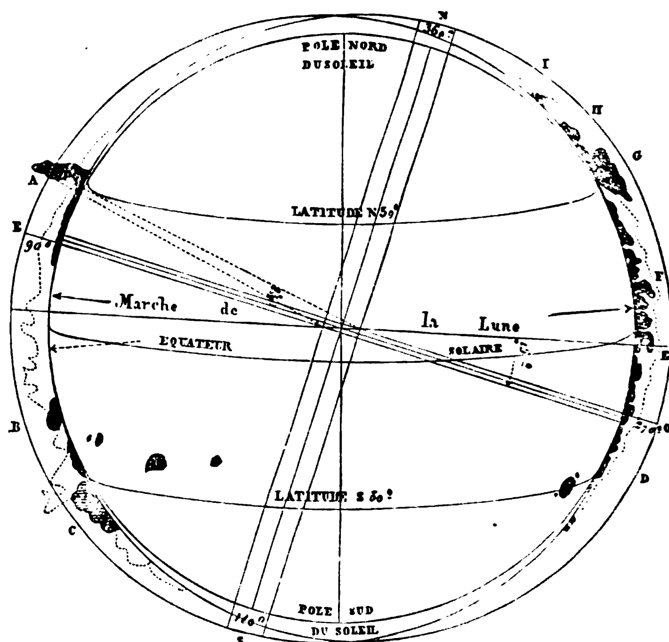
Cette figure parle assez par elle-même et fait voir quelles sont les dimensions des protubérances. Par l'observation directe, on avait trouvé pour la corne A une hauteur de 3 minutes; il résulte de l'observation photographique que cette hauteur est réellement de 3′22″, plus de 10 fois le diamètre de la Terre, environ 650000 kilomètres.

Dans cette éclipse, le nombre des protubérances n'était pas moins grand qu'en 1860. De plus, les observateurs étant

(1) *Monthly Notices of astr. Soc.*, t. XXIX, p. 3.

échelonnés sur une ligne très-longue, leurs observations embrassent un intervalle de temps plus considérable. Or on trouve que la grande protubérance photographiée à Aden par l'expédition allemande diffère un peu de celle qui a été photographiée à Guntoor. On a donc la preuve d'un mouvement

Fig. 139.



intérieur qui s'est produit d'une manière sensible pendant un intervalle de quarante minutes. La réalité de ce mouvement et des changements qui en sont la conséquence paraît d'ailleurs confirmée par les dessins des différents observateurs. Ainsi, à Malacca, les observateurs français représentent la protubérance A inclinée vers la droite. Deux heures quarante minutes plus tard, à Mantawalock, elle apparaissait comme une tour droite avec une pointe dirigée dans le sens op-

posé (*fig.* 140, B). A Aden elle paraissait inclinée à droite, tandis qu'à Labouan elle se dirigeait vers la gauche. Du reste les observations optiques s'accordent avec les photographies pour la représenter avec une structure spirale, comme l'indique la *fig.* 140, due au major Tennant. La réalité de ces variations ne peut plus être révoquée en doute.

On a également remarqué dans les photographies les traces de l'arc rosé et une nébulosité assez vive s'étendant de l'équateur solaire jusqu'à la région des taches, observation qui justifie ce que nous avions dit en 1860 de la forme elliptique de l'atmosphère solaire. Cette atmosphère est indiquée dans la

Fig. 140.

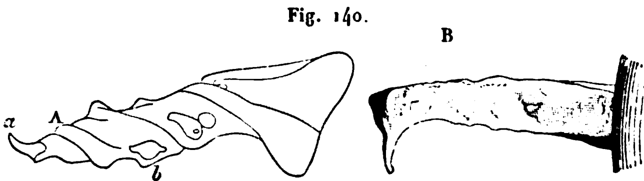
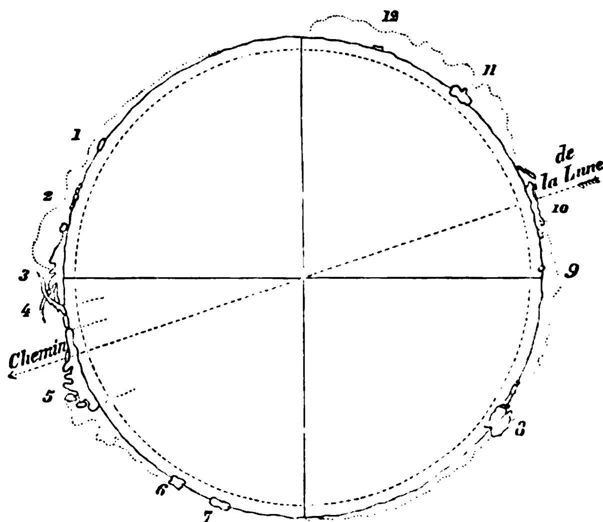


fig. 139 par un trait ponctué. En 1867, le P. Cappelletti avait observé dans la même région une lumière plus vive, et il avait pu faire cette remarque malgré un voile de nuages qui couvrait la couronne.

Les astronomes américains ont fait d'intéressantes photographies pendant l'éclipse de 1869. Ils ont obtenu des impressions directes en une seconde, ce qui montre une fois de plus la grande activité chimique de la lumière des protubérances. Il faut aussi en conclure qu'on peut photographier un grand nombre de phases de la même éclipse en se servant de châssis qui permettent de produire plusieurs impressions successives sur les différentes parties d'un même cliché : on évite ainsi la perte de temps qui est inséparable de l'opération lorsqu'on est obligé d'enlever le châssis pour en mettre un autre à sa place. Nous avions préparé nos appareils pour suivre cette mé-

thode au 20 décembre 1870, mais l'état du ciel ne nous permit pas de réussir. La *fig.* 141 montre quelle était ce jour-là la distribution générale des protubérances et l'élévation considérable qu'elles atteignaient. Celles qui sont désignées par les chiffres 4 et 5 avaient une hauteur de 2′15″, c'est-à-dire environ 8 fois le diamètre de la Terre. Elles ressemblent à des jets de matière gazeuse ou à des nuages entraînés par les courants

Fig. 141.



violents. La photographie reproduisit les arcs lumineux au delà des limites qui leur étaient assignées par les observations optiques. Ces épreuves furent obtenues directement au foyer de l'objectif. Le D[r] Curtis obtint les siennes en agrandissant les images avec l'oculaire ; elles donnent au contour des protubérances une structure vaporeuse qui convient parfaitement à de véritables nuages.

Tels sont les résultats auxquels on est parvenu en étudiant ces phénomènes dans les occasions si rares et si aventureuses

des éclipses; nous pouvons les résumer de la manière suivante.

Le Soleil est environné d'une atmosphère très-élevée, dont la hauteur est au moins égale à la moitié de son rayon. Elle est plus étendue à l'équateur qu'aux pôles, et de plus sa hauteur et son éclat présentent deux maximum de part et d'autre de l'équateur entre 35 et 40 degrés de latitude. Dans cette atmosphère flotte une couche continue de matière rose, possédant un grand pouvoir photogénique, dont la hauteur est variable et le contour irrégulier. Cette matière se soulève quelquefois et forme tantôt des colonnes verticales, tantôt des nuages isolés; ces colonnes et ces nuages sont entraînés d'une manière très-appréciable par des courants atmosphériques. La couche rose possède une hauteur plus considérable et une plus grande activité photogénique dans la région des taches, là même où nous avons déjà constaté la plus grande élévation de température.

Mais il aurait fallu bien des siècles pour arriver à connaître la structure de cette couche et les mouvements dont elle est le siége, sans l'heureuse découverte qui nous permet maintenant de l'observer tous les jours et d'étudier à chaque instant sa composition chimique et les variations capricieuses qu'elle subit. Les premiers pas faits dans cette voie méritent d'être connus, et c'est pour cela que nous allons exposer en détail l'historique de cette découverte.

CHAPITRE IV.

OBSERVATIONS SPECTRALES FAITES PENDANT LES ÉCLIPSES.

§ I. — *Nature chimique des protubérances.*

Avant l'année 1861, on aurait regardé comme impossible de déterminer la nature chimique des substances qui se trouvent dans les corps célestes; mais, depuis les découvertes de MM. Bunsen et Kirchhoff, depuis les progrès de l'analyse spectrale, ce problème est devenu du même ordre que ceux que le chimiste résout chaque jour dans son laboratoire. Nous ne reviendrons pas sur les premiers principes de cette science, que nous avons exposés précédemment.

A l'approche de l'éclipse de 1868, on se proposa d'étudier particulièrement la nature des protubérances en profitant des nouvelles découvertes de l'analyse spectrale. Les questions à résoudre étaient les suivantes :

1° Les protubérances sont-elles composées de matières solides et doit-on les comparer à des nuages simplement incandescents, ou bien sont-elles des masses véritablement gazeuses?

2° Quelles sont les substances qui entrent dans leur composition?

La première de ces deux questions devait être résolue aussitôt qu'on dirigerait un spectroscope vers les protubérances; il s'agissait simplement de voir si le spectre était continu ou non. Nous savons, en effet, qu'une matière simplement incan-

descente produit un spectre continu : c'est ce qui arrive pour le charbon qui se trouve en suspension dans la flamme d'une bougie. Les gaz eux-mêmes peuvent donner un spectre continu lorsque leur température est extrêmement élevée; mais, toutes les fois qu'on obtient un spectre composé de raies brillantes séparées les unes des autres par des espaces noirs, on a certainement affaire à une matière gazeuse dont la nature chimique peut être déterminée par le nombre et la position des raies. Le problème était, en pratique, plus difficile qu'on ne l'avait supposé d'abord; mais ces difficultés n'effrayèrent pas MM. Janssen, Rayet, Herschel, Weisse et Tennant qui se dévouèrent à ce travail.

Il fallait avoir des lunettes puissantes, capables de former des images assez nettes des protubérances; de plus, ces lunettes devaient avoir un mouvement automatique, afin que les images produites sur la fente du spectroscope y fussent retenues pendant un temps assez considérable. Les spectroscopes devaient avoir un pouvoir dispersif assez grand pour séparer les raies; il fallait cependant éviter d'exagérer leur pouvoir, afin de perdre le moins de lumière possible. Il y avait donc lieu d'étudier les meilleures conditions pour bien observer, et, comme il était impossible de faire des essais préliminaires, on devait croire que la première éclipse servirait surtout à faire l'épreuve des différentes méthodes. En vue de faciliter le succès, nous proposâmes d'employer un spectroscope simplifié, réduit à un simple prisme à vision directe placé entre l'objectif et l'oculaire (1). En observant ainsi, on aurait décomposé la lumière des protubérances comme on fait pour la flamme d'une lampe à alcool dans laquelle brûlent

(1) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. LXVI, p. 402.

plusieurs sels différents. On n'a employé ce procédé que plus tard; mais, avec d'autres méthodes, on a obtenu de bons résultats, comme nous le verrons bientôt.

Toutes ces difficultés ne découragèrent pas les astronomes, et leurs efforts furent couronnés par un magnifique succès. Les observateurs les plus heureux furent M. Janssen à Guntoor, M. Rayet à Malacca, le capitaine Herschel et le major Tennant à Guntoor, M. Weisse à Aden. L'éclipse présenta des circonstances très-favorables; l'énorme protubérance A (*fig.* 139 et 140) fut immédiatement aperçue par les observateurs qui dirigèrent vers elle tous leurs instruments et constatèrent immédiatement un spectre discontinu formé d'un petit nombre de raies brillantes. La première partie du problème était donc résolue : on avait acquis la certitude que les protubérances sont des masses gazeuses.

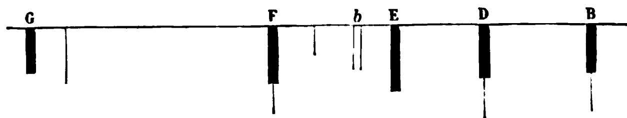
Il s'agissait alors de reconnaître la nature des substances qui les composent, et cette seconde question n'était pas aussi simple que la première; car il s'agissait de fixer la position des raies par rapport à une échelle quelconque, en prenant pour terme de comparaison le spectre d'une substance connue ou celui du Soleil. Il y eut dans cette partie des observations une incertitude bien pardonnable, vu la difficulté de l'entreprise, difficulté qui fut encore accrue par la présence des nuages.

L'analyse la plus détaillée est celle de M. Rayet. Il observa dans le spectre de la protubérance A sept raies principales, dont quelques-unes avaient une telle vivacité qu'elles produisaient une espèce de queue dans le champ de l'instrument. La *fig.* 142 est la reproduction de celle qui fut publiée dans les *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*. Dans cette figure, on a employé les mêmes lettres que Fraunhofer pour désigner des raies que l'on croyait coïncider avec les

siennes; mais il y eut quelques inexactitudes dans cette appréciation. On a désigné par B la raie qui correspond réellement à la raie C de Fraunhofer; quant à celle qu'on a marquée D, sa position n'est qu'approchée, ainsi que celle de G. La position de F est rigoureusement exacte. Janssen et Herschel ont signalé la vraie position de C; Herschel ne put cependant la donner d'une manière précise à cause des nuages qui gênèrent ses observations.

M. Rayet mit successivement la fente de son spectroscope dans deux directions rectangulaires; aussi sommes-nous parfaitement certains que le spectre ainsi observé appartient bien

Fig. 142.



réellement à la protubérance. Dans une seconde observation, il analysa la lumière d'un second point, et il ne trouva plus qu'une seule raie située dans le violet, d'où il faudrait conclure que toutes les protubérances n'ont pas la même composition chimique.

L'existence de la raie F étant parfaitement constatée, on était bien sûr que le gaz hydrogène était l'une des matières composant cette protubérance; mais il fallait déterminer la nature des gaz auxquels appartiennent les autres raies. La température était évidemment très-élevée et comparable à celle que produit le passage de l'étincelle électrique dans les tubes de Geissler. Du reste cette comparaison sert à expliquer la couleur rose des protubérances, puisque l'hydrogène se colore ainsi lorsque, après l'avoir raréfié, on l'illumine par une décharge électrique.

Cette étude était cependant incomplète, car il fallait s'assurer de l'identité des différentes raies. Cette détermination paraissait exiger qu'on attendît une nouvelle éclipse; mais M. Janssen nous a dispensés de cette longue attente par une découverte de la dernière importance. Il fut vivement frappé du brillant éclat de quelques-unes des raies des protubérances, et il se demanda alors si ces mêmes raies ne seraient pas visibles en plein jour. Malheureusement le ciel se couvrit de nuages peu de temps après l'éclipse, et il lui fut impossible ce jour-là de vérifier sa conjecture. Dès le lendemain il se mit à l'œuvre, et il eut l'insigne bonheur de voir en plein jour les raies des protubérances. La fente de son spectroscope étant exactement tangente au bord du Soleil, à un endroit où la veille il avait remarqué une flamme, il aperçut une raie brillante colorée en rouge, correspondant à la raie C de Fraunhofer; puis, dans le bleu, une autre raie brillante correspondant exactement à la raie F. Ces deux raies sont précisément celles de l'hydrogène, et, par conséquent, ce gaz est la principale des substances qui composent les protubérances.

Le jour même où cette nouvelle arriva en Europe (20 octobre), M. Lockyer annonçait que, de son côté, il avait pu voir, sur le bord du Soleil, les raies de l'hydrogène accompagnées d'une raie inconnue située près de la raie D. Cette découverte était assez importante pour qu'on s'occupât immédiatement de la vérifier, et il nous fut possible d'y réussir le jour même où la nouvelle nous parvint. Les recherches furent alors poursuivies avec ardeur par un grand nombre d'astronomes. MM. Lockyer, Zöllner, Rayet, Wolf se mirent à l'œuvre pour exploiter ce champ fécond, et nous avons essayé de rivaliser de zèle avec eux. Nous parlerons, dans le Chapitre suivant, de l'abondante moisson qui a été le fruit de

ce travail : nous devons en ce moment exposer la suite des études qui ont été faites sur le même sujet pendant les éclipses.

§ II. — *Spectre des protubérances et du bord solaire dans les éclipses postérieures de* 1870 *et de* 1871.

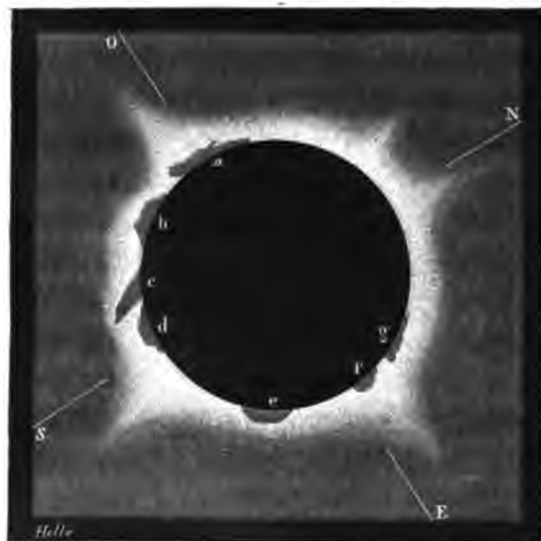
L'étude des protubérances pendant les éclipses présente toujours un grand intérêt, ne fût-ce que pour constater l'identité des raies qu'on observe dans les deux cas, et l'exactitude des formes déterminées par l'observation spectrale. Cette étude fut donc reprise en 1869 par M. Harkness à Des Moines en Amérique, et par M. Young à Burlington ; ils employèrent pour l'observation des protubérances des méthodes plus parfaites et des instruments plus puissants que tous ceux dont on avait disposé jusqu'alors.

L'appareil se compose de deux lunettes unies ensemble et dont les axes sont parfaitement parallèles ; l'une des deux est munie d'un spectroscope, l'autre est disposée auprès de la première comme un chercheur, mais elle est plus puissante que ne le sont les chercheurs ordinaires : il serait même bon que son pouvoir amplifiant fût égal à celui de la lunette spectrale. Elle contient un réticule composé d'une pointe très-aiguë ou de deux fils très-fins croisés à angle droit, et l'appareil doit être assez bien centré pour que le même objet forme son image, d'une part à la croisée des fils du réticule dans le chercheur, d'autre part sur la fente du spectroscope dans la lunette principale. L'astronome peut donc, au moyen d'une échelle convenablement éclairée et bien fixée dans le spectroscope, examiner sans préoccupation les raies qui s'offrent à ses yeux, pendant que son aide, se servant du chercheur,

dirige successivement l'appareil sur les différentes protubérances qui environnent le disque de la Lune.

La *fig.* 143 représente la position exacte et la grandeur approchée des protubérances observées ce jour-là par M. Eastman. C'est à cette figure que se rapportent les lettres

Fig. 143.



contenues dans le tableau suivant avec la position des raies correspondantes, indiquée d'après l'échelle de Kirchhoff.

PROTUBÉRANCES.	POSITION DES RAIES D'APRÈS L'ÉCHELLE DE KIRCHHOFF.					
a	693	1007	1497	"	"	"
c	693	1007	1497	"	2069	"
e	693	1007	1497	1611	2069	2770
f	693	1007	1497	"	2069	2770
Couronne seule.	"	"	1497	"	"	"

La raie 693 correspond à C de Fraunhofer ou Hα de l'hy-

drogène. A la place de 1007, il faut sans doute lire 1017, qui correspond à la raie jaune des protubérances. Cette raie, nommée D_3, est à une distance de D′ du sodium un peu plus grande que le double de l'espace compris entre ces deux lignes. La raie 1497 est probablement identique à celle de la couronne, qui correspond à 1474. Le nombre 2069 correspond à $H\beta$ de l'hydrogène, 1611 appartient au magnésium ou peut-être au fer, 2770 correspond probablement à $H\gamma$ de l'hydrogène. La position de toutes ces raies n'est pas rigoureusement exacte; mais les divergences sont assez faibles pour qu'on puisse les attribuer aux erreurs d'observation qui sont inévitables dans ces circonstances ([1]).

Le tableau que nous avons mis sous les yeux du lecteur conduit à admettre que les raies ne sont pas les mêmes dans toutes les protubérances; mais M. Harkness explique cette différence par les circonstances mêmes de l'observation. Une même protubérance ne donne pas, en effet, le même nombre de raies suivant le point qu'on examine : il y en a plus à la base et moins au sommet. Il paraît probable qu'elles donneraient le même spectre si on les observait toutes à la même hauteur.

Quelques observateurs ont aperçu d'autres raies que celles qui sont contenues dans le tableau précédent; mais ils n'en ont pas fixé la position d'une manière précise, ce qui enlève à leurs observations une grande partie de leur valeur.

En 1870, quoique les astronomes fussent principalement occupés à étudier la couronne, on ne négligea cependant pas l'étude des protubérances. MM. Nobili et Lorenzoni à Terranova et M. Burton à Augusta observèrent des raies très-

---

([1]) *Voir* la collection intitulée : *Reports publ. by com. Sands*, p. 64.

nombreuses; mais la présence des nuages ne leur permit pas d'en fixer la position d'une manière précise. Pour nous, comme nous avions pris la direction des opérations photographiques, il nous fut impossible de nous occuper des observations spectrales, si ce n'est à la fin de la totalité, comme nous le dirons dans le paragraphe suivant.

§ III. — *Découvertes dues à l'étude spectrale du bord solaire.*

Les découvertes les plus importantes qui furent faites pendant les éclipses de 1870 et de 1871 sont celles qui firent connaître la constitution des bords du disque et révélèrent, par conséquent, la nature intime de la couche la plus extérieure du globe solaire.

Occupés, comme nous l'étions, à l'exécution des photographies, il nous fut impossible d'observer le spectre pendant la plus grande partie de l'éclipse; mais aussitôt que la totalité fut terminée, en quelques secondes seulement, grâce à un mécanisme très-simple, nous pûmes diriger notre spectroscope vers la pointe effilée du croissant solaire. Nous fûmes très-surpris de voir un spectre tout à fait discontinu, et nous pensâmes immédiatement que la fente du collimateur était sans doute chargée de poussière. Nous n'aurions pas dû nous arrêter à cette pensée, car la poussière aurait produit des lignes longitudinales, tandis que les raies brillantes que nous avions sous les yeux étaient perpendiculaires à la longueur du spectre; sans prendre le temps de la réflexion, nous regardâmes la fente pour la nettoyer; mais nous trouvâmes qu'elle était très-élargie : on l'avait ainsi disposée pour étudier directement les protubérances. Nous reconnûmes

alors que nous avions sous les yeux un phénomène jusqu'alors inconnu, et, après avoir rétréci la fente, nous dirigeâmes de nouveau l'instrument vers l'angle du croissant solaire. La discontinuité subsistait encore, mais beaucoup moindre qu'auparavant; au bout de quelques secondes elle cessa complétement et le spectre reprit sa structure ordinaire. Nous avions donc observé un spectre d'une nature toute particulière, composé d'une multitude de lignes brillantes et renversées, qu'il nous fut impossible d'analyser, et qui appartient exclusivement au mince filet du bord solaire.

M. Young fut plus heureux; occupé exclusivement de l'étude spectrale, il put observer complétement le phénomène que nous n'avions fait qu'entrevoir.

Voici ses propres paroles : « Quelques instants avant la totalité, j'avais disposé la fente tangentiellement au bord solaire, et je regardais la raie 1474 qui venait de s'illuminer ainsi que celle du magnésium et du fer. A mesure que le croissant devenait plus mince, je notais l'évanouissement successif de toutes les raies situées dans le champ de l'appareil, mais rien ne m'annonçait le beau phénomène dont je fus témoin à l'instant où la Lune couvrit complétement toute la photosphère. Alors le champ se remplit subitement de raies lumineuses qui brillèrent comme un éclair et disparurent peu à peu; au bout de deux secondes, il n'en restait plus rien, si ce n'est les deux que j'avais aperçues tout d'abord. Je ne puis pas sans doute assurer que toutes ces lignes brillantes occupaient dans le spectre la même position que les raies noires qui les avaient précédées; je crois cependant en être certain, car j'eus le temps de remarquer cette identité dans différents groupes, et je fus frappé de l'intensité relative et de la disposition générale de ces raies comme d'une chose qui m'était bien familière. Cette observation confirme l'existence

du spectre continu trouvé par Secchi au bord du disque, et je crois qu'elle appuie les idées de Kirchhoff sur la constitution du Soleil et sur l'origine des raies du spectre ([1]). »

Telles sont les paroles de M. Young. Nous reviendrons bientôt sur sa dernière réflexion. Nous devons en ce moment continuer le récit des observations faites sur le même sujet.

Le phénomène signalé par Young était trop important pour qu'on ne prît pas des mesures afin de l'observer de nouveau en 1871, et il fut en effet l'objet des recherches de plusieurs savants. Dans l'impossibilité où nous sommes de reproduire toutes les observations qui ont été publiées, nous croyons devoir donner ici le texte même du Rapport de M. Maclear, le plus heureux de tous les observateurs :

« Au moment du premier contact, aucun changement ne fut signalé dans le spectre. En maintenant pendant un quart d'heure la fente du collimateur tangentiellement à la pointe septentrionale du croissant, on vit la ligne C très-brillante dans toute sa longueur; la ligne F était aussi lumineuse, mais faible. La fente ayant alors été disposée perpendiculairement au croissant, quatre lignes brillantes devinrent visibles près de la raie C qui conserva son éclat : l'une était à sa droite, à une distance plus petite que 10 unités de Kirchhoff; les trois autres étaient du côté du rouge, à une distance plus petite que 20 unités ([2]). Les longueurs de ces lignes variaient d'un instant à l'autre, mais non pas simultanément; en moyenne, elles occupaient $\frac{1}{8}$ de la hauteur du spectre visible.

» A $6^h 51^m$, temps moyen, vingt-cinq minutes après le pre-

---

([1]) Voir *American Journal of Science*, febr. 1871, et *Nature*, 1 febr. 1871.

([2]) Ces lignes semblent être celles qui deviennent très-noires dans le spectre des taches.

mier contact, le spectroscope étant dirigé vers une large protubérance, on vit la raie C s'allonger jusqu'à occuper la moitié de la hauteur du spectre. Neuf minutes plus tard, la pointe du croissant coïncidait avec une autre protubérance située à environ 13 degrés du nord.

» A $7^h 8^m$, avec un spectroscope à vision directe dont la fente était dirigée suivant un rayon du disque solaire, je vis une raie brillante un peu plus réfrangible que la bande de l'azote, située entre *b* et F. Vers 1830 de l'échelle de Kirchhoff, il y avait une raie très-faible qui disparut bientôt; mais presque aussitôt la raie F parut se dédoubler sur une hauteur à peu près égale à sa hauteur ordinaire, $\frac{1}{8}$ du spectre.

» A $7^h 23^m$, observant de nouveau avec le spectroscope à six prismes dont la fente était perpendiculaire au croissant, j'ai vu les raies de l'hydrogène, puis D, E et *b* de même épaisseur dans toute leur étendue, et en même temps plusieurs autres raies commençaient à devenir visibles : autant que j'ai pu en juger, c'étaient toutes les raies du fer situées dans l'intervalle compris depuis la demi-distance de D à E jusqu'au delà de *b*. Ces raies du fer conservant leur éclat et devenant plus nombreuses, j'appelai M. Lockyer pour le rendre témoin de ce phénomène; nous le *suivîmes* ensuite pendant deux ou trois minutes, jusqu'au moment où il fallut se disposer à observer la totalité. Pendant ces deux ou trois minutes, les pointes du croissant avaient passé de nord 38 degrés est à nord 70 degrés est. Les raies demeurèrent d'ailleurs visibles juqu'au moment où je déplaçai la lunette pour disposer la fente tangentiellement au point où devait se produire le premier contact intérieur. *Le champ du spectroscope était alors rempli de lignes brillantes se détachant sur un spectre coloré et éclairé juste assez pour montrer les lignes noires bien connues du spectre solaire.* Au moment de la totalité, la lumière dimi-

nua, et *les raies brillantes augmentèrent rapidement en nombre et en éclat*. A partir de ce moment, elles pâlirent, non pas instantanément, mais assez vite pour qu'il me soit impossible d'indiquer l'ordre de leur disparition. Toutefois, les raies de l'hydrogène D et *b*, et quelques autres comprises dans l'intervalle qui les sépare, restèrent visibles plus longtemps. Celles-ci ayant disparu à leur tour, le champ devint complétement obscur. »

Telle est la relation de M. Maclear. La seconde partie de l'éclipse fut malheureusement perdue pour lui ; mais M. Pringle et le capitaine Fyers ont, pendant cette seconde phase, observé en partie le même phénomène ; plusieurs autres observateurs ont également aperçu des raies brillantes. M. Respighi, qui observait avec un simple prisme placé en avant de l'objectif, ne vit aucune raie au commencement de la totalité ; mais il les observa au moment où elle allait cesser. M. Pringle nous fait connaître une circonstance importante : après avoir vu une multitude de raies brillantes, il observa pendant quelques instants un spectre continu très-faible et d'une étendue peu considérable. M. Respighi, observant près du bord lorsque le croissant était encore très-mince, remarqua que les raies de Fraunhofer étaient sensiblement plus noires que de coutume.

§ IV. — *Conclusions qui résultent des observations précédentes.*

Tous ces faits sont extrêmement intéressants pour la théorie du Soleil. Déjà nous y avons fait allusion en exposant comment nous avons pu reconnaître l'existence d'une couche dont le spectre est continu ; nous avons expliqué comment,

par un renversement partiel, cette couche fait disparaître les raies noires : c'est cette observation que rappelle M. Young à la fin du passage que nous avons cité plus haut. La région du bord solaire, dans laquelle toutes les raies du spectre se renversèrent successivement, doit en effet donner un spectre continu lorsqu'on l'observe en dehors des éclipses, car l'éclat lumineux des raies directes doit compenser l'obscurité des raies d'absorption. Nous savons d'ailleurs que M. Pringle, avec un appareil moins puissant, a vu en effet un spectre parfaitement continu.

M. Janssen, dans ses observations de 1868, a cherché en vain la couche dans laquelle on doit, d'après la théorie de Kirchhoff, apercevoir les raies renversées. Il s'attendait à la voir avec une épaisseur considérable, ainsi que l'annonçait M. Kirchhoff; aussi, n'ayant pu rien voir de semblable, de ce résultat purement négatif il crut pouvoir conclure que cette couche n'existe pas et que l'absorption se produit dans la photosphère. Il est malheureux qu'il ne s'en soit pas tenu à l'idée qu'il avait émise lui-même, que cette couche est très-peu élevée, ce qui est parfaitement exact.

Il résulte donc de toutes ces observations que la théorie de Kirchhoff doit être admise comme démontrée, avec une seule modification, c'est que la couche absorbante n'est pas aussi élevée qu'il le supposait. Ajoutons cependant que cette modification n'a pas une aussi grande portée qu'on pourrait le croire. Il est bien vrai que la partie de cette atmosphère qui est assez lumineuse pour donner un spectre ne s'élève pas très-haut; mais rien ne prouve que la diffusion des vapeurs s'arrête là, et tout nous porte à croire qu'elles s'étendent beaucoup plus loin, mais à un état qui ne leur permet pas de nous envoyer de radiations lumineuses assez considérables pour que nous puissions les observer dans les circonstances

ordinaires. Nous savons, en effet, que M. Respighi, observant avec un simple prisme, a vu un spectre parfaitement continu s'étendant à une grande distance des bords.

C'est ainsi que, par les observations importantes qu'elles ont permis de faire, les éclipses ont complété la théorie de l'origine des raies de Fraunhofer et amené le triomphe des idées de Stoney et de Kirchhoff. Le Soleil est donc entouré d'une atmosphère véritable, composée de vapeurs métalliques qui, à cette température élevée, sont vraiment à l'état de gaz. Les raies de Fraunhofer se produisent par absorption, comme la bande noire qui se produit dans le spectre de l'arc voltaïque lorsqu'on y brûle une masse un peu considérable de sodium ou de thallium.

Qu'il nous soit permis de rapporter ici une remarque que nous avons faite en 1855 en étudiant l'étincelle électrique [1]. Frappé de la discontinuité des spectres que donne dans cette étincelle la vapeur des métaux, nous fûmes conduit à poser nettement cette question : le Soleil n'est-il pas gazeux? Nous n'hésitions pas à dire dès ce moment que, vu les raies dont son spectre est sillonné, il doit être entouré d'un fluide élastique absorbant. Nous étions alors bien loin de devancer Kirchhoff en formulant avant lui la théorie que nous venons d'exposer; mais le seul fait de la discontinuité nous avait tellement frappé que nous n'hésitions pas à en tirer la conclusion que nous venons de rappeler.

---

[1] *Nuovo Cimento di Pisa*, t. I.

§ V. — *Analyse spectrale de la couronne.*

Dans les premières observations spectrales des éclipses, on n'a pas su distinguer les raies qui appartiennent à la couronne de celles qui sont dues aux protubérances. En 1868, le major Tennant étudia la couronne en donnant à la fente de son appareil une largeur assez considérable : il trouva un spectre continu et faiblement éclairé. M. Janssen n'observa non plus aucune raie, ni noire, ni brillante. M. Rzhia avait disposé un spectroscope ordinaire pour analyser la lumière de la couronne pendant la totalité ; il ne vit aucune raie, peut-être à cause de la faiblesse de la lumière. M. Rennoldson, observant avec un simple prisme en avant de sa lunette, distingua dans la couronne différentes teintes : rouge, jaune verdâtre, bleu, violet (¹). Il ne dit pas si ces différentes régions étaient séparées l'une de l'autre ou bien si elles se succédaient sans interruption. On crut alors pouvoir conclure que la lumière de la couronne est due à la réflexion des rayons émanés du globe solaire.

Ces observations n'étant pas satisfaisantes, on se proposa de faire de nouvelles études. En 1869, M. Harkness remarqua qu'aux points où il n'y avait pas de protubérances la couronne avait un spectre tout particulier, consistant en une simple raie verte située tout près de la raie E du fer. M. Young la regarda comme identique avec la raie 1474 attribuée au fer par Kirchhoff, et il assure que l'incertitude ne dépasse pas celle qui existe entre C et Hα de l'hydrogène, car il la voyait, dans le champ de son instrument, se confondre avec la raie

(¹) *Voir* l'excellent Recueil de M. Weiss sur cette éclipse, p. 31.

noire correspondante. La longueur d'onde de cette raie 1474 est $0^{mm},0005316$.

Outre cette ligne verte, M. Harkness crut en voir deux autres plus faibles. M. Young les remarqua aussi et leur assigna des positions voisines de 1250 et 1350 de l'échelle de Kirchhoff; la première (1250) coïnciderait à peu près avec une raie observée par M. Winlock dans la lumière de l'aurore boréale. De plus, à la base de la couronne, les mêmes observateurs aperçurent un spectre continu faiblement éclairé.

Ces observations excitèrent l'attention des savants, et l'on attendait l'éclipse de 1870 pour lever tous les doutes et trancher les questions non résolues. M. Harkness, à Syracuse, fut contrarié par la tempête et ne put éclairer l'échelle de son spectroscope : il dut se contenter de regarder les raies sans pouvoir en fixer la position. M. Young put déterminer la position de la raie la plus importante avec une précision qui paraît satisfaisante. M. Lorenzoni l'observa trois fois et lui assigna une position comprise entre 1463 et 1467, ce qui diffère très-peu du résultat trouvé par M. Young; les circonstances dans lesquelles il se trouvait l'empêchèrent de voir autre chose. Le R. P. Denza observait à Augusta avec un spectroscope adapté à un chercheur de comètes à très-grande ouverture, ce qui lui permettait d'avoir beaucoup de lumière. Pendant les quelques instants où le ciel se découvrit à moitié, il remarqua deux raies, la principale, très-brillante, dans le vert, et une autre moins réfrangible située entre E et D; des recherches postérieures lui font admettre 1246 pour position de cette seconde raie, ce qui est d'accord avec la détermination de M. Young. Il ne resterait donc à vérifier que la troisième (1350 K.). On ne doit pas être surpris de voir des différences dans les spectres décrits par les différents observateurs : la composition de la couronne peut n'être pas la

même à toutes les époques et dans tous les points observés; certaines vapeurs qui s'y trouvent à un moment n'y sont peut-être pas toujours.

La même éclipse de 1870 a donné lieu à une observation très-intéressante. M. Tupmann dirigeait la lunette, tandis que M. Harkness observait au spectroscope. Comme on se proposait d'étudier spécialement la couronne, il fallait éviter les protubérances. Or, malgré le soin que prit M. Tupmann de s'éloigner autant que possible de ces flammes rouges, le spectre de l'hydrogène se mêla toujours avec celui de la couronne; et cependant le capitaine Tupmann est certain d'avoir réussi un grand nombre de fois à amener la fente du spectroscope dans une région éloignée de toute protubérance. Ce n'est donc pas accidentellement que le spectre de l'hydrogène s'est trouvé superposé à celui de la couronne. On a voulu expliquer ce phénomène par la diffusion due à l'atmosphère terrestre ou par d'autres illusions; mais ces explications ne sauraient être admises, et nous verrons que, en réalité, le spectre de la couronne est plus compliqué qu'on ne l'avait cru d'abord.

Dans les observations faites aux Indes, pendant l'éclipse de 1871, M. Janssen a vu la raie verte se projeter sur un spectre impur, dans lequel il a pu constater des raies noires d'absorption, et en particulier celle du sodium. Il ne faudrait donc pas admettre le résultat des observations précédentes dans lesquelles on n'avait pas vu de raies noires; cela peut tenir à ce qu'on avait donné à la fente une trop grande ouverture. Dans ces recherches, on doit éviter deux excès opposés : 1° une trop grande dispersion et une fente trop étroite rendent les observations difficiles, faute de lumière; 2° une fente trop large et une dispersion trop faible permettent difficilement de distinguer les raies et d'en fixer la position.

L'atmosphère terrestre peut encore être une cause d'erreur, si elle n'est pas bien transparente. Lorsqu'elle est chargée de vapeurs, elle peut diffuser la lumière de la couronne et accroître son étendue apparente. C'est ainsi que, à Cadix, le P. Perry observa le spectre des protubérances jusque sur le disque de la Lune; pour la même cause sans doute, M. Harkness aurait vu les raies vertes à 50 minutes du bord, ce qui rend vraisemblable l'observation de M. Winlock, qui les a vues à une distance de 20 minutes.

M. Abbay nous assure qu'il n'a vu aucune ligne noire. Il les vit disparaître successivement, et elles furent ensuite remplacées par les raies brillantes des protubérances (¹). Celles-ci disparurent à leur tour au bout de quelques secondes; il ne resta que la raie F et une autre moins réfrangible que *b*, située entre 1464 et 1494 : c'était sans doute la fameuse raie 1474.

En 1870, M. Pye a étudié l'intensité relative des différentes raies, et il l'a exprimée d'une manière approchée par les nombres suivants : $C = 8,5$; $D_3 = 5,5$; $1474 = 10,0$; $F = 3,0$.

La raie 1474 est la seule qu'on ait trouvée aux Indes dans le spectre de la couronne.

Nous devons citer en terminant l'observation très-importante de M. Respighi. Il avait simplement mis en avant de l'objectif de sa lunette un seul prisme ayant un angle réfringent assez petit. C'est une excellente idée et un perfectionnement heureux apporté à la méthode que nous avions proposée en 1868. Nous proposions de regarder à travers un prisme à vision directe placé auprès de l'oculaire; le prisme objectif est préférable : c'est le meilleur moyen surtout lors-

---

(¹) *Month. Not. of astr. Soc.*, t. XXX, p. 60.

qu'on observe avec une petite lunette. En employant cette méthode, on voit quatre images de chaque protubérance, correspondant aux quatre raies de l'hydrogène, de même qu'on voit trois images séparées lorsqu'on observe la flamme d'une lampe à alcool, après avoir mis sur la mèche des sels de sodium, de lithium, de thallium ou de cuivre.

Lorsque le Soleil disparut, M. Respighi vit quatre cercles très-brillants et diversement colorés : un rouge, un jaune, un vert, un bleu, et les traces d'un cinquième de teinte violette. Sur ces cercles, qui étaient ceux de la chromosphère, se détachaient les images monochromatiques très-vives des protubérances; ces images étaient parfaitement semblables, seulement celles du bleu et du violet étaient plus basses que celles du rouge et du jaune. Le fond général du champ était un spectre mal défini et faiblement éclairé. L'auréole se détachait au-dessus de la chromosphère, formant autant de cercles distincts. Le plus large, le plus diffus, et en même temps le plus régulier, était le vert, celui de la raie 1474. Le cercle rouge était aussi très-étendu, mais irrégulier sur son contour. Le cercle bleu et le jaune étaient moins étendus et moins lumineux : nous avons déjà dit que les images des protubérances correspondant à ces couleurs étaient plus basses.

Il résulte de cette observation que, si la couronne envoie principalement des rayons correspondant à la raie 1474, elle contient cependant, en outre, une assez grande quantité d'hydrogène, qui y est entraîné par son pouvoir de diffusion. C'est ce qui explique l'observation de M. Harkness, qui aperçut les raies de ce gaz, même en dehors des protubérances. Cette observation nous apprend également que la couronne contient quelques autres vapeurs qui donnent un spectre général très-composé et mal défini.

§ VI. — *Conclusions générales relatives à la couronne.*

De toutes ces recherches, il résulte que la couronne possède une lumière qui lui est propre, c'est-à-dire qu'elle est composée de substances dont la température est assez élevée pour qu'elles soient lumineuses par elles-mêmes. Ces substances sont principalement l'hydrogène, le corps qui correspond à la raie D_3, qu'on a appelé *hélium*, et le corps inconnu qui correspond à la raie 1474. De plus, la couronne nous envoie une certaine quantité de lumière diffuse dont nous parlerons à la fin de ce Chapitre.

Nous disons que la substance qui produit la raie verte est inconnue. Kirchhoff a dit que 1474 correspond au fer; mais nous avons, avec une lampe électrique, projeté le spectre du fer sur celui de la lumière solaire, et nous n'avons jamais observé cette raie; si d'autres physiciens l'ont obtenue, cela tenait peut-être aux échantillons de fer sur lesquels ils opéraient; aussi avons-nous peine à admettre que la vapeur de ce métal existe dans l'atmosphère solaire. Nous n'osons cependant pas le nier. Les expériences de M. Cornu nous ont appris que les raies métalliques ne se produisent pas et ne se renversent pas toutes à une même température; ne serait-ce pas là ce qui produirait les différences dans les résultats? D'ailleurs le fer se rencontre abondamment dans les taches, et c'est un des métaux dont les raies, même renversées, s'observent facilement sur le Soleil, en dehors des éclipses. Nous attendrons donc qu'on ait fait de nouvelles recherches.

Quant aux autres raies, elles présentent beaucoup d'incertitude. Plusieurs observateurs ont signalé la raie 1246, qui serait identique à celle de l'aurore boréale. Ce fait serait très-

intéressant, s'il venait à se confirmer parfaitement. Mais à quoi est dû le spectre des aurores polaires? Ce spectre nous offre plusieurs raies, mais elles sont toutes variables, à l'exception d'une seule, qui est bien constante; sa longueur d'onde est $0^{mm},0005571$: elle est située presque à moitié de la distance comprise entre C et D. Quant aux autres raies, voici la description qui en a été donnée par quelques observateurs :

a' longueur d'onde, de........	$0^{mm},000640$ à 630	Proctor.
a longueur d'onde...........	0,0005571	constante : Angström et tous les autres.
b longueur d'onde...........	0,0005546	Winlock et Clarck.
C longueur d'onde...........	0,0005315	Winlock et Clarck.
d près de F, longueur d'onde. .	0,0005210	Winlock et Clarck.
e près de G, longueur d'onde . .	0,0004649	Winlock et Clarck.

Dans la magnifique aurore du 4 février 1872, on a constaté partout que la raie d'Angström était visible sur toute la surface du ciel; mais il n'en était pas de même des autres : on ne les voyait qu'en certains points où la lumière était plus vive. Il est très-remarquable que, dans certaines régions d'un rouge très-prononcé, on ne voyait pas trace de la raie rouge, quoiqu'elle fût très-visible en d'autres endroits. On a cru observer les raies de l'hydrogène, mais on n'a pas déterminé leur position d'une manière satisfaisante. On a même vu des portions de spectre continu. Dans les moments où le phénomène était plus brillant, nous avons entrevu plusieurs raies, et, dans le vert, une partie du spectre nous a présenté l'apparence cannelée que possède celui de l'azote. On voit donc que la lumière de l'aurore polaire est très-variable, et il n'y a là rien qui doive nous surprendre. Le spectre de l'éclair est également très-variable : quelquefois il est cannelé comme celui de l'azote, quelquefois c'est un spectre de second ordre

semblable à celui de ce métalloïde; dans certaines décharges il y a de l'hydrogène, et plusieurs fois nous avons aperçu un nombre immense de raies. L'aurore se produisant dans les régions les plus élevées de l'atmosphère, son spectre doit dépendre de l'état de raréfaction et peut-être de la nature chimique des gaz qui occupent ces régions. De tout cela il résulte que le spectre de l'aurore est bien différent de celui de la couronne solaire.

Nous ne connaissons pas l'origine de la raie principale de l'aurore. M. Zöllner l'attribue à l'oxygène à une basse température [1]; quoi qu'il en soit, elle n'occupe certainement pas la même position que la raie principale de la couronne, et lors même qu'elle coïnciderait avec une des plus faibles, il n'en est pas moins vrai que nous ignorons complétement son origine.

On a dit aussi que la raie principale de l'aurore polaire est la même que celle de la lumière zodiacale; mais le spectre de la lumière zodiacale n'est pas véritablement *linéaire,* il est complétement diffus. On sait d'ailleurs que toutes les lueurs bleuâtres paraissent monochromatiques, quoiqu'elles soient réellement composées; c'est ce qui a lieu pour les étoiles, pour les corps phosphorescents, pour les vers luisants. Il est donc impossible de rien dire sur l'origine de ces raies ni sur leurs rapports avec celles de la couronne solaire.

Quelques savants ont pensé que l'existence d'une raie commune dans le spectre de l'aurore polaire et dans celui de la couronne prouverait que cette seconde lumière doit, comme la première, être attribuée à un phénomène électrique. Nous ne voulons pas nier l'existence de l'électricité dans le Soleil,

---

[1] *Nature,* t. III, p. 346.

mais nous ferons remarquer que l'électricité n'a pas la propriété spécifique de donner des raies qui puissent servir à la caractériser; en traversant les gaz, elle ne fait que les rendre lumineux par la chaleur qu'elle développe. Ces gaz devenus lumineux donnent par l'analyse spectrale des raies qui dépendent uniquement de leur nature chimique et de leur état physique, mais qui sont complétement indépendantes de la cause qui les a échauffés. La température du Soleil étant extrêmement élevée, il n'y a pas besoin d'une autre cause pour expliquer l'incandescence de son atmosphère. Les gaz ont des spectres différents, suivant les températures auxquelles ils sont portés : c'est un fait incontestable. M. Zöllner pense que la raie de la couronne est due à un gaz dont la température est peu élevée; c'est parfaitement possible, et l'expérience ne peut ni vérifier, ni contredire cette affirmation, car à une basse température et sous une faible épaisseur les gaz ne donnent certainement aucun spectre; mais il en peut être autrement lorsque l'épaisseur devient très-considérable, et c'est ce qui a lieu pour la couronne dont l'épaisseur est, partout où nous l'observons, plus grande que le diamètre solaire.

Dans les premières éclipses, on avait remarqué que les protubérances correspondaient aux parties les plus brillantes de la couronne. Pour voir si cette loi est générale, nous avons tracé, sur un même dessin, les protubérances observées à Rome et la couronne photographiée à la même époque pendant l'éclipse totale des Indes. Il résulte de cette comparaison que la coïncidence n'a pas toujours lieu, car il y a des protubérances qui correspondent à des dépressions de l'auréole.

M. Respighi, en observant, comme nous l'avons déjà dit, avec un prisme placé en avant de sa lunette, a trouvé que la couronne avait sensiblement la même épaisseur dans toute son étendue; il en a conclu qu'on se trompe lorsqu'on parle

de ses inégalités, des rayons et des panaches recourbés qui l'accompagnent, etc. Nous croyons qu'il a été induit en erreur par le mode d'observation qu'il employait. M. Maclear et d'autres astronomes ont déjà fait remarquer que la couronne paraît irrégulière dans son contour et accompagnée des rayons que nous avons décrits, lorsqu'on l'examine à l'œil nu ou avec un chercheur d'un faible pouvoir grossissant, mais que dans une grande lunette elle se réduit à un anneau étroit ayant une épaisseur de 5 à 6 minutes. M. Respighi évalue à 6 ou 7 minutes la largeur des cercles qu'il a observés, ce qui coïncide bien avec l'évaluation de M. Maclear. Évidemment, à travers son prisme, il n'a pu voir que la partie la plus brillante qui forme à peu près un anneau régulier; le reste étant très-peu lumineux, et se projetant sur le spectre diffus qui remplissait le champ, ne pouvait produire une impression sensible sur l'œil de l'observateur. Les nombreuses photographies qui ont été faites pendant les éclipses ne nous laissent aucun doute sur l'irrégularité du contour extérieur de la couronne, et il faut remarquer que ces photographies peuvent être considérées comme des images monochromatiques, car elles ne dépendent que de l'activité des rayons chimiques; et cependant, toutes les fois que l'air est bien pur, leurs formes sont presque identiques avec celles qu'on observe directement. Il n'y a donc pas d'illusion possible, quoique l'action actinique de la lumière puisse être différente de son action physiologique.

Il n'est pas aussi facile de dire quelle est l'origine de la lumière diffuse qui produit le spectre continu de la couronne. Il est bien certain qu'on ne peut l'attribuer ni à la Lune, ni à l'atmosphère terrestre. On a supposé alors que c'était le résultat d'une réflexion produite par les molécules des fluides élastiques qui composent la couronne elle-même. Cette lu-

mière continue ne proviendrait-elle pas simplement de l'incandescence des gaz qui enveloppent le Soleil? Nous regardons cette hypothèse comme fort probable.

On a étudié la couronne au polariscope, mais les résultats de cette observation sont trop équivoques pour trancher la question; car, même en admettant qu'il y ait des traces de polarisation, il serait difficile de prouver que ce phénomène n'a pas d'autre cause qu'une réflexion produite par l'atmosphère solaire.

M. Harkness, s'appuyant sur la faiblesse du pouvoir réflecteur que possèdent les gaz, attribue cette lumière à l'hydrogène et à des vapeurs simplement incandescentes. Lorsque le gaz hydrogène brûle à une basse température, sa flamme donne un spectre continu; dans le bleu, on remarque la raie F qui est très-faible et qui n'est certainement pas due aux impuretés du gaz. On pourrait invoquer ce fait pour confirmer l'opinion de M. Harkness, qui pense que toute réflexion est impossible dans une substance purement gazeuse. Sans vouloir trancher la question d'une manière définitive, nous pensons que ce spectre pourrait bien être dû à des masses simplement incandescentes, qui doivent sans doute se former dans la couche la plus élevée de l'atmosphère du Soleil.

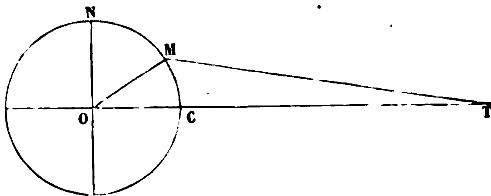
NOTE.

PROBLÈMES RELATIFS A LA ROTATION DU SOLEIL.

Problème I. — *Trouver la distance héliocentrique d'une tache à la Terre, connaissant sa distance géocentrique au centre du disque solaire.*

Soient T le centre de la Terre (*fig.* 144); O le centre du Soleil; C le point correspondant au centre du disque, où la droite TO rencontre la surface; M la position d'une tache : il s'agit de déterminer l'angle MOT, connaissant l'angle MTO.

Fig. 144.



Nous pouvons écrire

$$\frac{\sin \mathrm{OMT}}{\mathrm{OT}} = \frac{\sin \mathrm{MTO}}{\mathrm{MO}},$$

ou bien

$$\sin \mathrm{OMT} = \frac{\mathrm{OT}}{\mathrm{OM}} \sin \mathrm{MTO},$$

ou encore

$$\sin(\mathrm{MOT} + \mathrm{MTO}) = \frac{\mathrm{OT}}{\mathrm{OM}} \sin \mathrm{MTO}.$$

Or

$$\frac{\mathrm{OT}}{\mathrm{OM}} = \frac{\mathrm{OT}}{\mathrm{ON}} = \frac{1}{\tang \mathrm{R}},$$

en appelant R le rayon du Soleil réduit en minutes. Posons

$$\mathrm{MOT} = \rho, \quad \mathrm{MTO} = r;$$

nous aurons

$$\sin(\rho + r) = \frac{\sin r}{\tang R}.$$

Les angles R et r étant très-petits, nous pouvons remplacer le rapport $\frac{\sin r}{\tang R}$ par celui des arcs $\frac{r}{R}$, et l'équation devient

$$\sin(\rho + r) = \frac{r}{R},$$

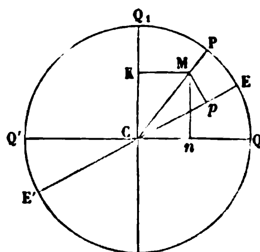
d'où

$$\rho + r = \arcsin\frac{r}{R}, \quad \text{ou} \quad \rho = \arcsin\frac{r}{R} - r.$$

Remarque I. — En remplaçant le rapport $\frac{\sin r}{\tang R}$ par celui des arcs $\frac{r}{R}$, on commet une erreur qui, dans les cas les plus défavorables, est égale à quelques centièmes de seconde seulement : on peut donc la négliger.

Remarque II. — On déterminera de la manière suivante les coordonnées équatoriales : la déclinaison sera $\Delta\delta = \mathrm{M}n$ (*fig.* 145)

Fig. 145.



et l'ascension droite $\Delta\alpha = \mathrm{KM} = \mathrm{C}n = 15t\cos\delta$, t étant le nombre de secondes qui s'écoule entre le passage de la tache et celui du centre.

L'angle de position $P = Q_1CM$ (*fig.* 145) se déduira des équations suivantes :

$$\operatorname{tang} P = \cot MCn = \frac{Cn}{Mn} = \frac{15t \cos \delta}{\Delta\delta},$$

$$r = CM = \frac{Mn}{\cos P} = \frac{Cn}{\sin P}.$$

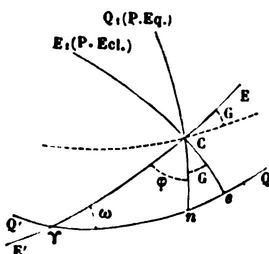
Problème II. — *Transformer les coordonnées équatoriales d'une tache en coordonnées prises par rapport à l'écliptique; c'est-à-dire, des différences* $\Delta\alpha$ *et* $\Delta\delta$, *déduire les différences de longitude et de latitude* ΔL *et* $\Delta\Lambda$.

Soient QQ′ le cercle parallèle à l'équateur céleste qui passe par le centre du disque; EE′ l'écliptique; $G = ECQ$ l'angle de ces deux plans. Nous pouvons écrire

$$\Delta L = Cp = CM \cos MCp = CM \sin (Q_1CM + ECQ) = r \sin (P + G),$$
$$\Delta\Lambda = Mp = CM \sin MCp = CM \cos (Q_1CM + ECQ) = r \cos (P + G).$$

L'angle G est égal à celui que font entre eux les cercles de latitude et de déclinaison se croisant au centre C du disque solaire (*fig.* 146). Si donc Q♈ représente l'équateur solaire, dont le pôle est en Q_1

Fig. 146.



et ♈E l'écliptique, nCQ_1 sera le cercle de déclinaison, et E_1Ce celui de latitude; l'angle G sera $Q_1CE_1 = nCe$. Cet angle aura pour complément $♈Cn = \varphi$; mais $\cot \varphi = \operatorname{tang} C♈n \cos C♈$; donc

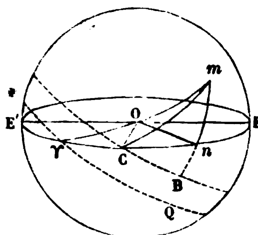
$$\operatorname{tang} G = \operatorname{tang} \omega \cos \odot,$$

$\odot$ étant la longitude du Soleil et ω l'obliquité de l'écliptique.

Problème III. — *Connaissant les coordonnées géocentriques d'une tache par rapport à l'équateur céleste, trouver ses coordonnées héliocentriques par rapport à l'écliptique.*

Soient O (*fig.* 147) le centre du Soleil ; C le centre du disque vu

Fig. 147.



de la Terre, de sorte que le rayon OC prolongé passe par le centre de la Terre. Soient ECE' l'écliptique ; CB le parallèle céleste ; Q♈ l'équateur. La longitude de la Terre vue du Soleil ♈OC = ☉̊ sera égale à ☉ + 180°. Le triangle sphérique mCn donne l'équation

$$\tang Cn = \tang Cm \cos mCn,$$

et, en employant les mêmes notations que dans les problèmes précédents, nous aurons, en posant $Cn = \eta$,

$$\tang \eta = \tang \rho \sin (P + G),$$

et, pour la valeur de la longitude Λ,

$$\Lambda = \Upsilon On = \Upsilon OC + nOC = \mathring{\odot} + \eta = 180^\circ + \odot + \eta;$$

pour la latitude λ

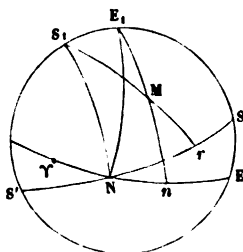
$$\sin \lambda = \sin mn = \sin \rho \cos (P + G).$$

Dans le calcul de ces coordonnées on devra observer la règle des signes.

Problème IV. — *Connaissant les coordonnées héliocentriques rapportées à l'écliptique de trois positions d'une même tache, déterminer les éléments de la rotation solaire, c'est-à-dire la longitude du nœud N, l'inclinaison I de l'equateur céleste sur l'écliptique et la durée de la rotation.*

Soient E_1 le pôle de l'écliptique (*fig.* 148); S_1 celui de l'équateur

Fig. 148.



solaire; M la position d'une tache; N l'intersection de l'équateur solaire et de l'écliptique. On aura

$$\cos S_1M = \cos E_1M \cos S_1E_1 + \sin E_1M \sin S_1E_1 \cos S_1E_1M,$$

$$S_1M = 90° - Mr = 90° - \lambda',$$

λ' étant la latitude héliographique, c'est-à-dire prise par rapport à l'équateur solaire;

$$S_1E_1M = S_1E_1N + NE_1n = 90° + NE_1n = 90 + \nu,$$

ν étant la distance de la tache au nœud, distance comptée sur l'écliptique, de sorte que

$$A = \Upsilon n = \Upsilon N + Nn = N + \nu;$$

d'où

$$\nu = A - N,$$

et, en substituant,

$$\sin\lambda' = \sin\lambda \cos I - \cos\lambda \sin I \sin(A - N)$$
$$= \sin\lambda \cos I - \cos\lambda \sin I \sin A \cos N + \cos\lambda \sin I \cos A \sin N.$$

Divisons les deux membres de l'équation par cos I,

$$\frac{\sin \lambda'}{\cos I} = \sin \lambda - \cos \lambda \sin A \operatorname{tang} I \cos N + \cos \lambda \cos A \operatorname{tang} I \sin N.$$

Posons

$$\frac{\sin \lambda'}{\cos I} = x, \quad \operatorname{tang} I \cos N = y, \quad \operatorname{tang} I \sin N = z;$$

$$\sin \lambda = A, \quad \cos \lambda \sin A = B, \quad \cos \lambda \cos A = C;$$

l'équation devient

$$x = A - By + Cz.$$

Chaque observation donnant des valeurs correspondantes λ et A, trois observations fourniront trois équations qui serviront à déterminer x, y et z. Il n'y aura plus qu'à résoudre les équations

$$\operatorname{tang} N = \frac{z}{y}, \quad \operatorname{tang} I = \frac{z}{\sin N} = \frac{y}{\cos N}, \quad \sin \lambda' = x \cos I.$$

S'il y a plus de trois observations, on emploiera la méthode des moindres carrés.

Pour la durée de la rotation, on l'obtiendra de la manière suivante : le triangle sphérique S_1E_1M nous donne l'angle au pôle

$$E_1S_1M = 90^\circ - NS_1M = 90^\circ - \beta.$$

De là on déduit

$$\frac{\sin E_1S_1M}{\sin E_1M} = \frac{\sin S_1E_1M}{\sin S_1M}, \quad \frac{\cos \beta}{\cos \lambda} = \frac{\cos (A - N)}{\cos \lambda'},$$

$$\cos \beta = \frac{\cos \lambda \cos (A - N)}{\cos \lambda'}.$$

Pour une autre position, on aura

$$\cos \beta_1 = \frac{\cos \lambda_1 \cos (A_1 - N)}{\cos \lambda'_1};$$

on en déduira la valeur de $\beta_1 - \beta$ qui correspond à l'intervalle de

temps $T' - T$; la durée d'une rotation entière Ξ sera donnée par la proportion

$$\frac{\beta' - \beta}{T_1 - T} = \frac{360}{\Xi}.$$

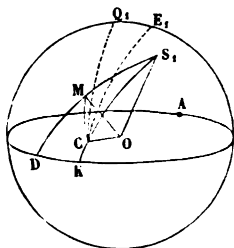
Dans l'état actuel de la Science, ces déterminations absolues ne sont plus nécessaires; comme l'étude des différentes taches conduit à des résultats différents, il vaut mieux employer une méthode plus expéditive, dans laquelle on peut grouper plusieurs taches, comme nous allons le voir.

Problème V. — *Connaissant les éléments approchés de la rotation solaire, calculer leurs corrections.*

Voici la solution de M. Carrington.

Soient S_1 (*fig.* 149) le pôle de rotation du Soleil; M la position

Fig. 149.



d'une tache; Q_1 le pôle nord de la sphère céleste; E_1 celui de l'écliptique; C la position de la Terre vue du Soleil, la droite OC passant par le centre de la Terre; ADK l'équateur solaire; S_1C le méridien qui passe par le centre de la Terre. $ADK = L$ sera la longitude héliographique de la Terre, comptée sur l'équateur solaire à partir du nœud A, et $CK = D$ sera sa latitude; $AD = l$ sera la longitude héliographique de la tache M, comptée également à partir du nœud A, et $DM = \lambda'$ sera sa latitude. Appelons X l'angle MCS_1 compris entre l'arc de position MC de la tache et le méri-

dién solaire qui passe par la Terre. Le triangle sphérique S_1MC donnera

$$\cos MS_1 = \cos MC \cos CS_1 + \sin MC \sin CS_1 \cos MCS_1,$$

ou

$$(1) \qquad \sin\lambda' = \cos\rho \sin D + \sin\rho \cos D \cos X$$

et

$$\frac{\sin MS_1C}{\sin MC} = \frac{\sin MCS_1}{\sin MS_1},$$

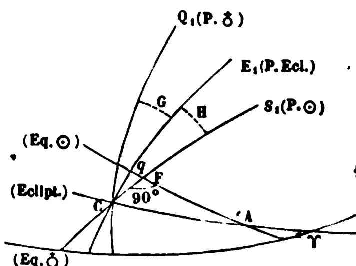
ou

$$(2) \qquad \sin(L - l) = \frac{\sin\rho \sin X}{\cos\lambda'}.$$

L'angle $S_1CM = X$ est composé de trois parties : 1° $MCQ_1 = P$, c'est l'angle que forme l'arc ρ avec la direction du pôle céleste ; 2° $Q_1CE_1 = G$, c'est l'angle que forment les deux grands cercles menés du point C au pôle de la Terre et à celui de l'écliptique ; 3° $E_1CS_1 = H$, c'est l'angle que fait le méridien passant par le pôle solaire avec celui qui passe par le pôle de l'écliptique. Ces angles se calculeront de la manière suivante.

Soit ♈AC l'écliptique (*fig.* 150), C étant toujours la direction

Fig. 150.



dans laquelle la Terre est vue du centre du Soleil : traçons le cercle de déclinaison CQ_1, le cercle de latitude céleste CE_1 et le cercle de latitude solaire CS_1 ; ce dernier coupera l'équateur à angle droit au

point F, et le triangle AFC rectangle en F donnera

$$\tan AF = \tan AC \cos FAC.$$

D'ailleurs

$$AC = \Upsilon C - \Upsilon A = \odot - N = 180 + \odot - N$$

et

$$FAC = I.$$

Donc

$$(3) \qquad \tan L = \tan(\odot - N)\cos I,$$

et

$$\frac{\sin FC}{\sin FAC} = \frac{\sin AC}{\sin 90^\circ},$$

$$(4) \qquad \sin D = \sin(\odot - N)\sin I.$$

Le même triangle nous donne encore

$$FCA = 90^\circ - FCq = 90^\circ - H,$$

d'où

$$(5) \qquad \cot FCA = \tan H = \tan I \cos(\odot - N).$$

L'angle G sera donné par la formule déjà trouvée

$$(6) \qquad \tan G = \tan \omega \cos \odot,$$

d'où

$$X = P + H + G.$$

Les valeurs de L et D seront données par les formules (3) et (4); ensuite on calculera λ' avec la formule (1) et $(L - l)$ avec l'équation (2), d'où

$$L - (L - l) = l,$$

Alors, en partant d'un premier méridien, avec le nombre g de jours écoulés et avec la valeur ξ de l'arc de rotation diurne adopté primitivement, on calculera la valeur de $g\xi$ et l'on verra la différence $l - g\xi$ qui donnera la correction de la durée adoptée pour la rotation.

[illegible] pour [illegible] avec [illegible]

[illegible] du méridien [illegible]

[illegible] des calculs trop [illegible] pourra consulter [illegible] trouvera [illegible] nombreuses [illegible] Carrington, surtout [illegible]

FIN DE LA PREMIÈRE PARTIE

Paris. — Imprimerie de GAUTHIER-VILLARS, 55, quai des Augustins.

Dans le travail de Carrington, on a adopté pour durée de la rotation $25^j,38$. Pour un intervalle de g jours, on doit donc avoir

$$\frac{25,38}{360} = \frac{g}{l},$$

l étant compté à partir de la coïn[illegible]lence [illegible] méridien mobile avec le nœu[illegible]

La [illegible]ction des autres éléments demande des calculs trop longs pour que nous puissions les donner ici. On pourra consulter l'Ouvrage de Carrington, page 232 et suivantes; on trouvera dans le même Ouvrage des Tables qui abrègent beaucoup le calcul. Nous devons cependant avertir le lecteur que de nombreuses fautes d'impression se sont glissées dans l'Ouvrage de M. Carrington, surtout dans les pages 12 et 13.

FIN DE LA PREMIÈRE PARTIE.

1496 Paris. — Imprimerie de GAUTHIER-VILLARS, 55, quai des Augustins.

